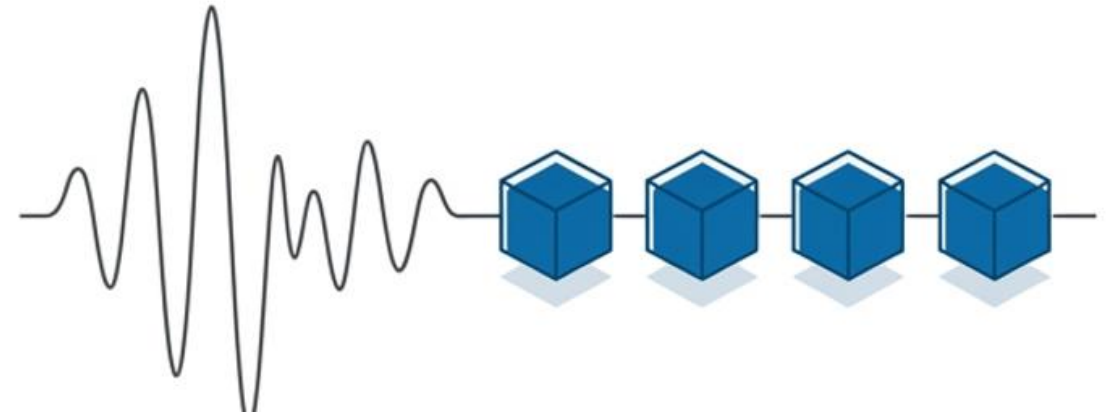


ΔΙΚΤΥΩΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΩΝ

Voice-over-IP (VoIP)

Αρχιτεκτονική, Προκλήσεις και
Μηχανισμοί Ανάκαμψης



Δρ. Παντελής Μπαλαούρας
Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Ε.Κ.Π.Α.
2026

Περιεχόμενα

3.1 Απαιτήσεις και χαρακτηριστικά VoIP

3.2 Απώλειες πακέτων την στιγμή αναπαραγωγής

3.3 Ανάκαμψη από απώλειες πακέτων

3.3.1 Ανάκαμψη από απώλειες πακέτων λόγω καθυστερημένης άφιξης

Προσέγγιση 1: Σταθερή καθυστέρηση πριν την αναπαραγωγή

Προσέγγιση 2: Δυναμική καθυστέρηση πριν την αναπαραγωγή

3.3.2 Ανάκαμψη από απώλειες πακέτων στο δίκτυο

Στρατηγική 1: Απλό FEC

Στρατηγική 2: FEC με piggyback

Στρατηγική 3: Διάπλεξη

3.4 Υπολογισμός RTT, Jitter & Ρυθμό απώλειας πακέτων

3.1 Απαιτήσεις & χαρακτηριστικά

VoIP

Τύπος 3: Συνδιάλεξη φωνής/video over IP

Voice over IP / VoIP

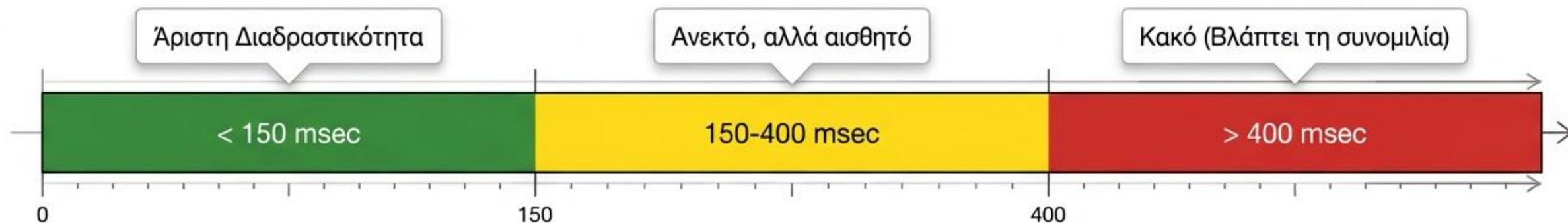
Voice-over-IP (VoIP): Ιδιαίτερες απαιτήσεις

- **καθυστέρηση από-άκρο-σε-άκρο:** χρειάζεται για να διατηρηθεί το στοιχείο της συνομιλίας
- **εκκίνηση συνόδου:** πώς ο καλούμενος διαφημίζει την IP δ/νση, τον αριθμό θύρας και τους αλγόριθμους κωδικοποίησης;
- **υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας:** προώθηση κλήσης, έλεγχος, καταγραφή
- **υπηρεσία έκτακτης ανάγκης:** 911

Ο Βασικός Κανόνας του VoIP: Όρια Καθυστερήσης

Ο πρωταρχικός στόχος του VoIP είναι η διατήρηση της φυσικής ροής και του διαδραστικού στοιχείου της ανθρώπινης συνομιλίας.

End-to-End Delay Gauge



Η Απαίτηση Καθυστερήσης Από-Άκρο-Σε-Άκρο:

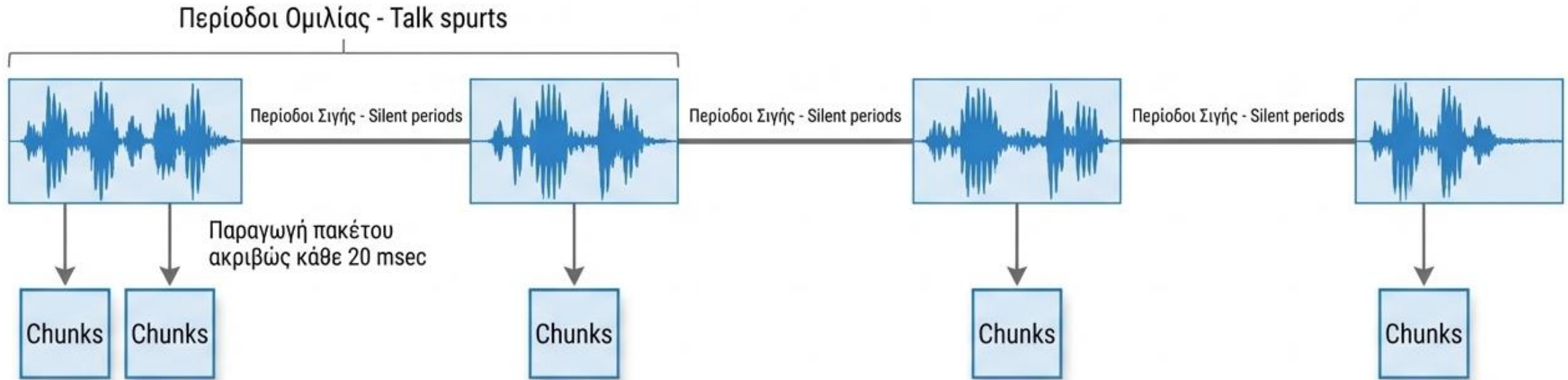
Περιλαμβάνει το άθροισμα πολλαπλών παραγόντων καθυστέρησης:

- 1.** Δίκτυο: Χρόνος διάδοσης, καθυστερήσεις επεξεργασίας και αναμονής στους δρομολογητές.
- 2.** Επίπεδο Εφαρμογής: Χρόνος πακεταρίσματος στο τερματικό αποστολής και καθυστέρηση αναπαραγωγής στον δέκτη.

Χαρακτηριστικά VoIP

- **Ήχος του ομιλητή:** εναλλασσόμενες
 - περίοδοι ομιλίας (talk spurts),
 - περίοδοι σιγής (silent periods).
 - 64 kbps κατά την περίοδο ομιλίας
 - Παράγονται πακέτα μόνο όταν μιλάει ο ομιλητής
 - **Τμήματα** διάρκειας 20 msec με 8 Kbytes/sec: 160 bytes δεδομένων
- Κεφαλίδες επιπέδου εφαρμογής προστίθενται σε κάθε **τμήμα**
 - Αριθμός ακολουθίας
 - Χρονοσφραγίδα δημιουργίας του πρώτου byte
- Τμήμα + κεφαλίδα ενθυλακώνονται σε UDP ή TCP τμήμα.
- Η εφαρμογή στέλνει το UDP τμήμα στο socket κάθε 20 msec κατά την διάρκεια της ομιλίας.

Η Ανατομία της Ψηφιακής Ομιλίας



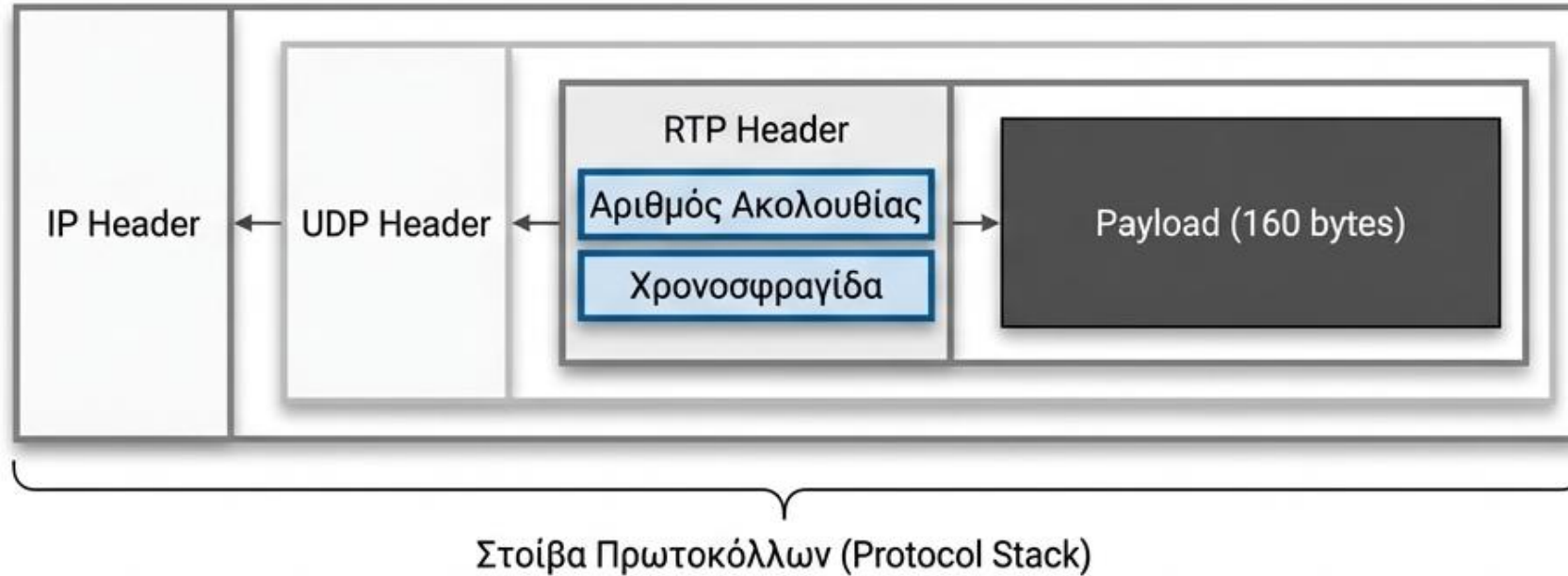
Χαρακτηριστικά Εκπομπής

- Ο ήχος εναλλάσσεται μεταξύ περιόδων ομιλίας και σιγής.
- Παράγονται πακέτα μόνο όταν ο χρήστης μιλάει.
- Ρυθμός μετάδοσης: 64 kbps (κατά την ομιλία).

Το Τεμάχιο Δεδομένων (Chunk)

- Διάρκεια: 20 msec ανά τμήμα.
- Βάσει ρυθμού 8 Kbytes/sec, το ωφέλιμο φορτίο είναι ακριβώς 160 bytes δεδομένων.
- Η εφαρμογή στέλνει δεδομένα στο socket κάθε 20 msec.

Διαστρωμάτωση και Ενθυλάκωση (Encapsulation)



Κάθε τμήμα 160 bytes εξοπλίζεται με μια **Κεφαλίδα Επιπέδου Εφαρμογής (RTP)** που προσθέτει δύο κρίσιμες πληροφορίες:

1. **Αριθμός Ακολουθίας**: Επιτρέπει στον δέκτη να εντοπίσει χαμένα ή εκτός σειράς πακέτα.
2. **Χρονοσφραγίδα**: Καταγράφει την ώρα δημιουργίας του πρώτου byte, απαραίτητη για το συγχρονισμό.

Το τμήμα και η κεφαλίδα ενθυλακώνονται τυπικά σε UDP, και έπειτα σε IP datagram. Παράλληλα, το RTCP χρησιμοποιείται για έλεγχο.

3.2 Απώλειες πακέτων την στιγμή αναπαραγωγής

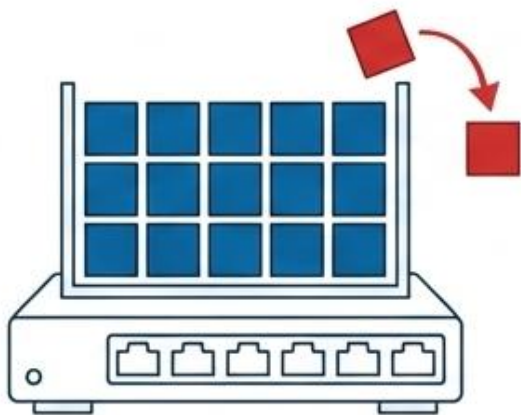
VoIP

VoIP: απώλεια πακέτων κατά την αναπαραγωγή

- 1. Απώλειες δικτύου:** Το IP datagram χάνεται λόγω συμφόρησης του δικτύου (υπερχείλιση στους buffers των δρομολογητών)
- 2. Απώλειες καθυστέρησης:** Το IP datagram φτάνει πολύ αργά για αναπαραγωγή στον δέκτη
 - καθυστερήσεις: επεξεργασίας, αναμονής στην ουρά, καθυστερήσεις στα τερματικά συστήματα (αποστολέας, παραλήπτης)
 - τυπική τιμή **μέγιστης ανεκτής καθυστέρησης: 400 ms**
 - καθυστέρηση αναπαραγωγής, αριθμός ακολουθίας, χρονοσφραγίδες

Οι Δύο Μορφές Απώλειας Πακέτων

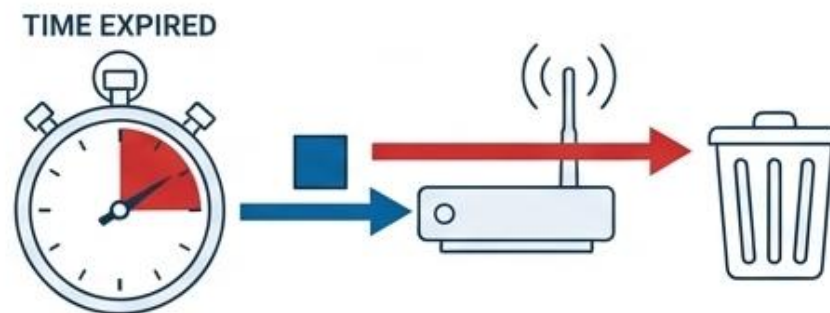
1. Απώλειες Δικτύου (Network Loss)



Αιτία: Το IP datagram χάνεται λόγω συμφόρησης του δικτύου.

Μηχανισμός: Οι ενταμιευτές (buffers) των δρομολογητών στη διαδρομή γεμίζουν και υπερχειλίζουν, με αποτέλεσμα την απόρριψη του πακέτου.

2. Απώλειες Καθυστέρησης (Delay / Jitter Loss)



Αιτία: Διακύμανση της καθυστέρησης μετάδοσης (Jitter).

Μηχανισμός: Το πακέτο δεν χάθηκε στο δίκτυο, αλλά φτάνει στον παραλήπτη αφού έχει παρέλθει η προκαθορισμένη στιγμή αναπαραγωγής του. Για την εφαρμογή, είναι πρακτικά νεκρό.

TCP ή UDP;

- Τυπική η **χρήση UDP** γιατί **εάν TCP τότε**
 - Καθυστέρηση λόγω της επαναμετάδοσης πακέτων στο TCP
 - Πιθανόν να ξεπεράσει τα 400 msec
 - Μείωση ρυθμού μετάδοσης λόγω του ελέγχου συμφόρησης (απώλεια πακέτων λόγω καθυστέρησης)
- Skype: χρήση UDP
 - εκτός και αν ένας χρήστης χρησιμοποιεί NAT ή είναι πίσω από firewall που μπλοκάρει UDP
- Στοίβα πρωτοκόλλων: RTP/UDP/IP & RTCP

Η Αρχιτεκτονική Επιλογή: Γιατί UDP και όχι TCP;

Το τίμημα της αξιοπιστίας είναι απαγορευτικό για επικοινωνία πραγματικού χρόνου.

TCP (Η Ακατάλληλη Επιλογή)

Μηχανισμός: Εγγυημένη παράδοση μέσω αναμεταδόσεων.

Επίπτωση στην Καθυστέρηση: Μια αναμετάδοση μπορεί εύκολα να εκτοξεύσει την καθυστέρηση >400msec.

Έλεγχος Συμφόρησης: Μειώνει το ρυθμό μετάδοσης όταν εντοπίζει συμφόρηση, προκαλώντας περαιτέρω απώλειες λόγω καθυστέρησης.

UDP (Η Τυπική Επιλογή)

Μηχανισμός: Υπηρεσία Best-effort χωρίς καμία εγγύηση παράδοσης.

Επίπτωση στην Καθυστέρηση: Ελάχιστη. Τα δεδομένα προωθούνται όσο πιο γρήγορα γίνεται.

Εξαίρεση (Skype): Χρησιμοποιεί UDP, εκτός αν η επικοινωνία μπλοκάρεται από NAT ή Firewall (τότε ως έσχατη λύση πέφτει σε TCP).

Είναι καταστροφική η απώλεια UDP/IP πακέτων;

- **Ανοχή στις απώλειες:** εξαρτάται από την κωδικοποίηση της φωνής, συγκάλυψη των απωλειών, ρυθμός απώλειας πακέτων μεταξύ 1% και 10% είναι συχνά ανεκτός
 - **Επίπεδο εφαρμογής: Μέθοδοι ανάκαμψης απώλειας πακέτων**
 - Μετάδοση πλεονασματικής πληροφορίας (Forward error correction)
 - Διάπλεξη
- **Απώλεια > 10%- 20% :** Δεν μπορούμε να κάνουμε κάτι για να επιτευχθεί αποδεκτή ποιότητα ήχου
 - Η υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας του επιπέδου δικτύου έχει τα όρια της

Είναι Καταστροφική η Απώλεια Πακέτων;

Η υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας (best-effort) του IP επιπέδου έχει όρια. Επειδή απουσιάζει το TCP, η ανοχή στις απώλειες εξαρτάται από το Επίπεδο Εφαρμογής.



Συμπέρασμα: Αφού το δίκτυο δεν εγγυάται την παράδοση, η εφαρμογή πρέπει να αναλάβει την ανάκαμψη.

3.3 Ανάκαμψη από απώλειες πακέτων

VoIP

Αιτίες και αντιμετώπιση απωλείων

1. Πρόβλημα: Απώλειες πακέτων λόγω **καθυστερημένης άφιξης** (delay)

- **Αιτία:** διακύμανση της καθυστέρησης (jitter) μετάδοσης πακέτων

- καθυστέρηση λόγω διάδοσης στις ζεύξεις, επεξεργασίας και αναμονής στους δρομολογητές

- **Λύση #1:** μέσω **καθυστερέησης της αναπαραγωγής** (play out delay)

1. Σταθερή καθυστέρηση αναπαραγωγής, ή
2. Προσαρμοσμένη, δυναμική καθυστέρηση αναπαραγωγής: Ακολουθία πακέτων, Χρονοσφραγίδες

2. Πρόβλημα: Απώλειες πακέτων στο δίκτυο

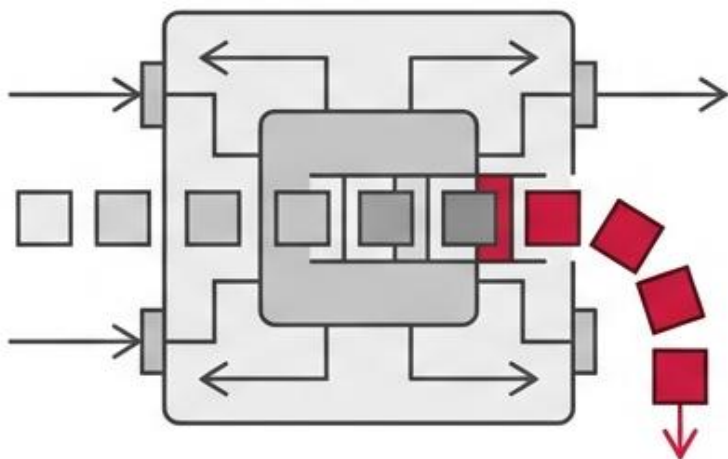
- **Αιτία:** Είναι γεμάτοι ένας ή περισσότεροι ενταμιευτές των δρομολογητών στη διαδρομή από τον αποστολέα στον παραλήπτη

- **Λύση #2:** Όχι αναμετάδοση πακέτων αλλά **Τεχνικές ανάκαμψης:**

- μέσω μετάδοσης πλεονάζουσας πληροφορίας
- διάπλεξης

Τα δύο πρόσωπα της απώλειας πακέτων

Απώλειες στο Δίκτυο



- **Αιτία:** Υπερχείλιση ενταμιευτών (buffers) στους δρομολογητές της διαδρομής.
- **Αντιμετώπιση:** Όχι αναμετάδοση. Ανάκαμψη μέσω πλεονάζουσας πληροφορίας (Redundancy) ή διάπλεξης (Interleaving).

Καθυστερημένη Άφιξη



- **Αιτία:** Διακύμανση της καθυστέρησης μετάδοσης (Jitter) λόγω αναμονής/επεξεργασίας στους κόμβους.
- **Αντιμετώπιση:** Καθυστέρηση της αναπαραγωγής (Playout Delay) – Σταθερή ή Προσαρμοσμένη.

Λύση #1: Ανάκαμψη από Καθυστέρηση & Jitter



Ο Μηχανισμός (Playout Delay):

Αντιμετώπιση της διακύμανσης καθυστέρησης μέσω εσκεμμένης καθυστέρησης της αναπαραγωγής. Ο δέκτης αποθηκεύει προσωρινά τα πακέτα πριν τα αναπαράγει.

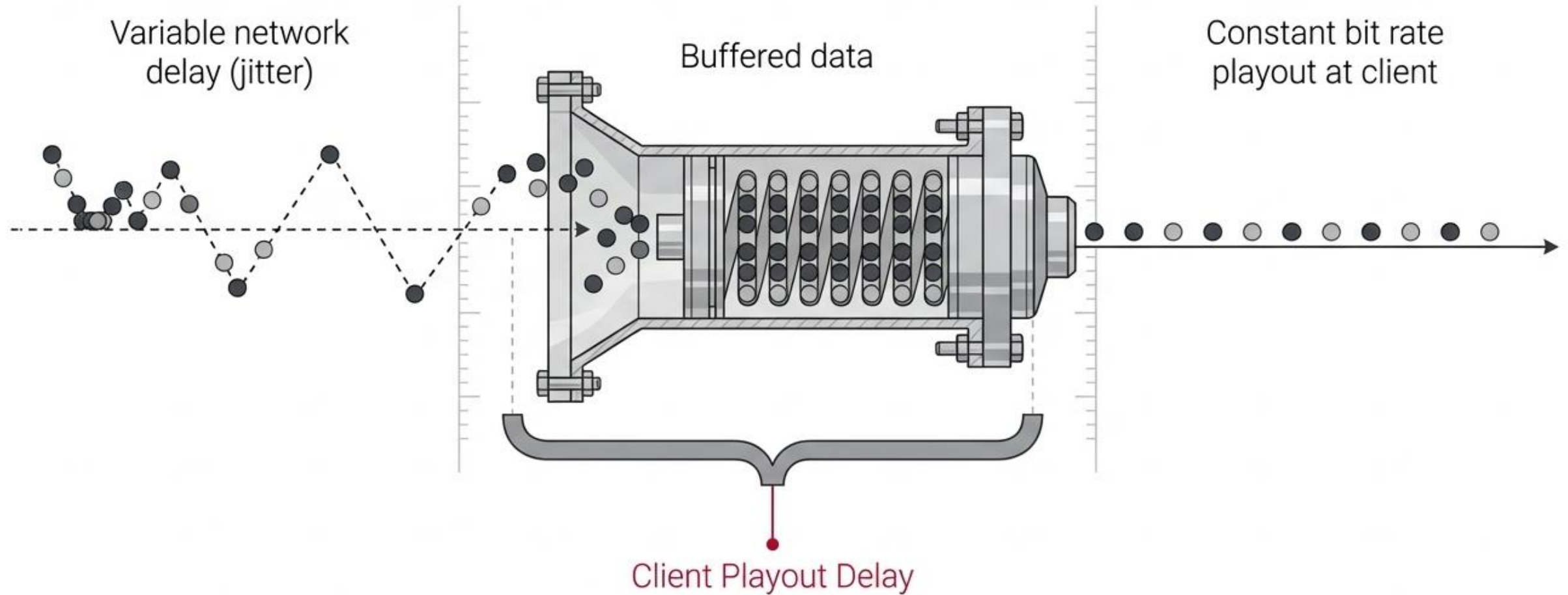
Μέθοδοι Αναπαραγωγής:

1. Σταθερή καθυστέρηση αναπαραγωγής: Στατικός χρόνος αναμονής.
2. Προσαρμοσμένη (Δυναμική) καθυστέρηση: Ο χρόνος αναμονής προσαρμόζεται δυναμικά στις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου.

Απαραίτητα Εργαλεία:

Η διαδικασία βασίζεται απόλυτα στους αριθμούς ακολουθίας και τις χρονοσφραγίδες (που προστέθηκαν στην Κεφαλίδα RTP).

Η Λύση: Ο Ενταμιευτής Αναπαραγωγής (Playout Buffer)

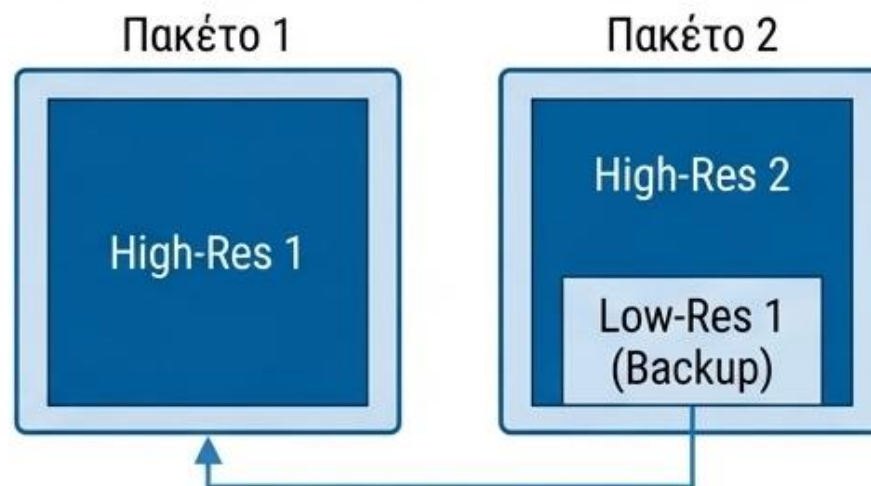


Λύση #2: Ανάκαμψη από Απώλειες Δικτύου

Διόρθωση στο Επίπεδο Εφαρμογής, χωρίς αναμετάδοση.

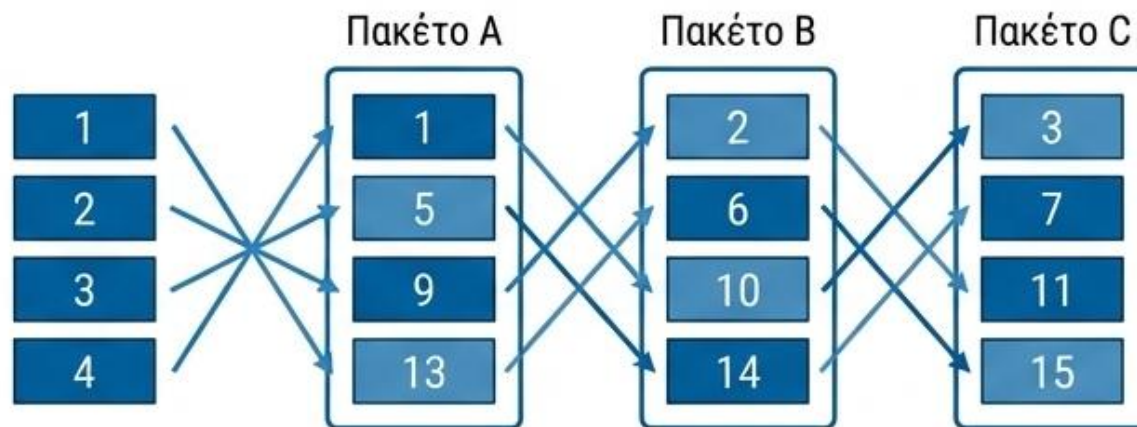
Μέθοδος A: Forward Error Correction (FEC)

Μετάδοση πλεονασματικής πληροφορίας. Κάθε πακέτο μεταφέρει δεδομένα από προηγούμενα πακέτα. Επιτρέπει την άμεση ανακατασκευή σε περίπτωση απώλειας.



Μέθοδος B: Διάπλεξη (Interleaving)

Αναδιάταξη και διασπορά των ηχητικών δεδομένων σε πολλαπλά πακέτα. Αν χαθεί ένα πακέτο, χάνονται μόνο μικρά, μη-συνεχόμενα τμήματα ήχου, τα οποία καλύπτονται εύκολα.



Η Μεγάλη Εικόνα: Συνοπτική Αρχιτεκτονική VoIP

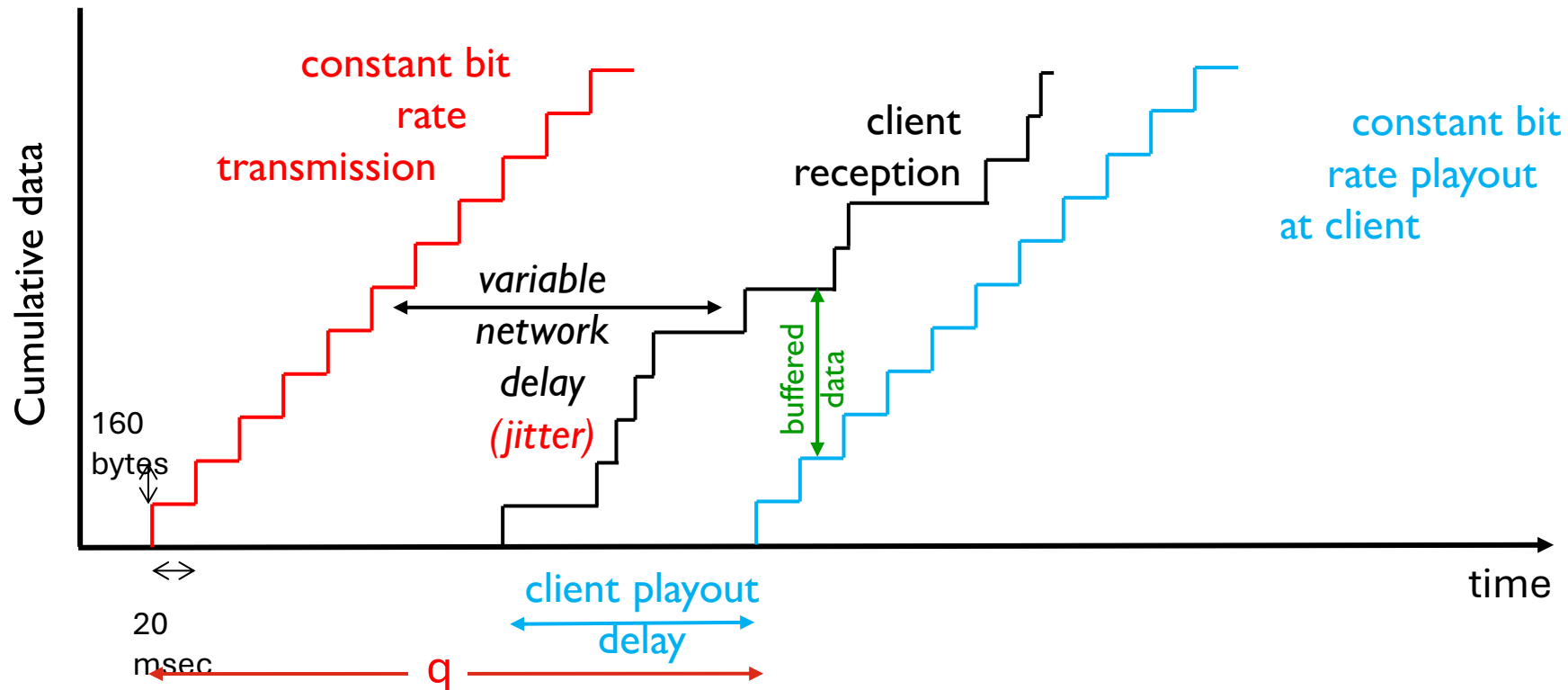
Η Πρόκληση	Το Αποτέλεσμα	Η Λύση Επιπέδου Εφαρμογής
Απαίτηση Διαδραστικότητας (<400ms)	→ Το TCP απορρίπτεται ως πολύ αργό	→ Χρήση UDP (γρήγορη υπηρεσία best-effort)
Διακύμανση Καθυστερήσης (Jitter)	→ Τα πακέτα φτάνουν ακανόνιστα ή αργά	→ Playout Delay (χρήση χρονοσφραγίδων & αριθμών ακολουθίας)
Απώλεια λόγω Συμφόρησης (Έως 10%)	→ Χαμένα δεδομένα δικτύου	→ FEC (Πλεονασμός) & Διάπλεξη (Interleaving)

Ο Χρυσός Κανόνας της Δικτύωσης Πολυμέσων: Ό,τι χάνει το Δίκτυο (Network Layer), καλείται να το διορθώσει η Εφαρμογή (Application Layer).

3.3.1 Ανάκαμψη από απώλειες πακέτων λόγω καθυστερημένης άφιξης

- Σταθερή καθυστέρηση πριν την αναπαραγωγή
- Δυναμική καθυστέρηση πριν την αναπαραγωγή

Αιτία: Διακύμανση της καθυστέρησης (Delay Jitter)



- Σκεφτείτε την από **άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση** δύο διαδοχικών πακέτων: η διαφορά μπορεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη των 20 msec
- Αριθμός ακολουθίας, χρονοσφραγίδες

Ανατομία της Διακύμανσης Καθυστέρησης (Delay Jitter)

Σταθερός ρυθμός (160 bytes / 20 msec).



Η διαφορά στην από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση δύο διαδοχικών πακέτων μπορεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη των 20 msec. Η ανίχνευση γίνεται μέσω Αριθμών Ακολουθίας και Χρονοσφραγίδων.

Προσέγγιση 1: Σταθερή καθυστέρηση (1)

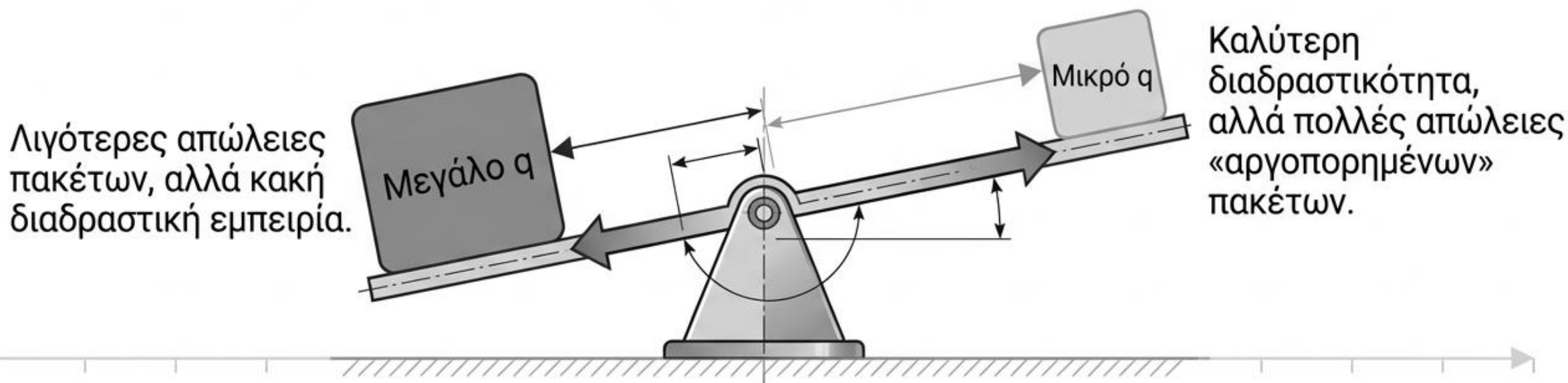
- Υπόθεση: Ο παραλήπτης επιχειρεί να αναπαράγει κάθε κομμάτι ακριβώς q msec (**σταθερό**) μετά την παραγωγή του.
 - Το απόσπασμα έχει χρονοσφραγίδα t
 - Ο παραλήπτης το αναπαράγει σε χρόνο $p=t+q$.
 - Τα κομμάτια που φτάνουν μετά από τον χρόνο $t+q$: τα δεδομένα φτάνουν πολύ αργά για αναπαραγωγή, τα δεδομένα θεωρούνται «χαμένα»
- Επιλογή κατάλληλης τιμής για το q :
 - μεγάλο q : λιγότερες απώλειες πακέτων λόγω καθυστέρησης
 - μικρό q : καλύτερη διαδραστική εμπειρία
 - Max: 400 msec

Προσέγγιση 1: Σταθερή Καθυστέρηση Αναπαραγωγής

Rule Box

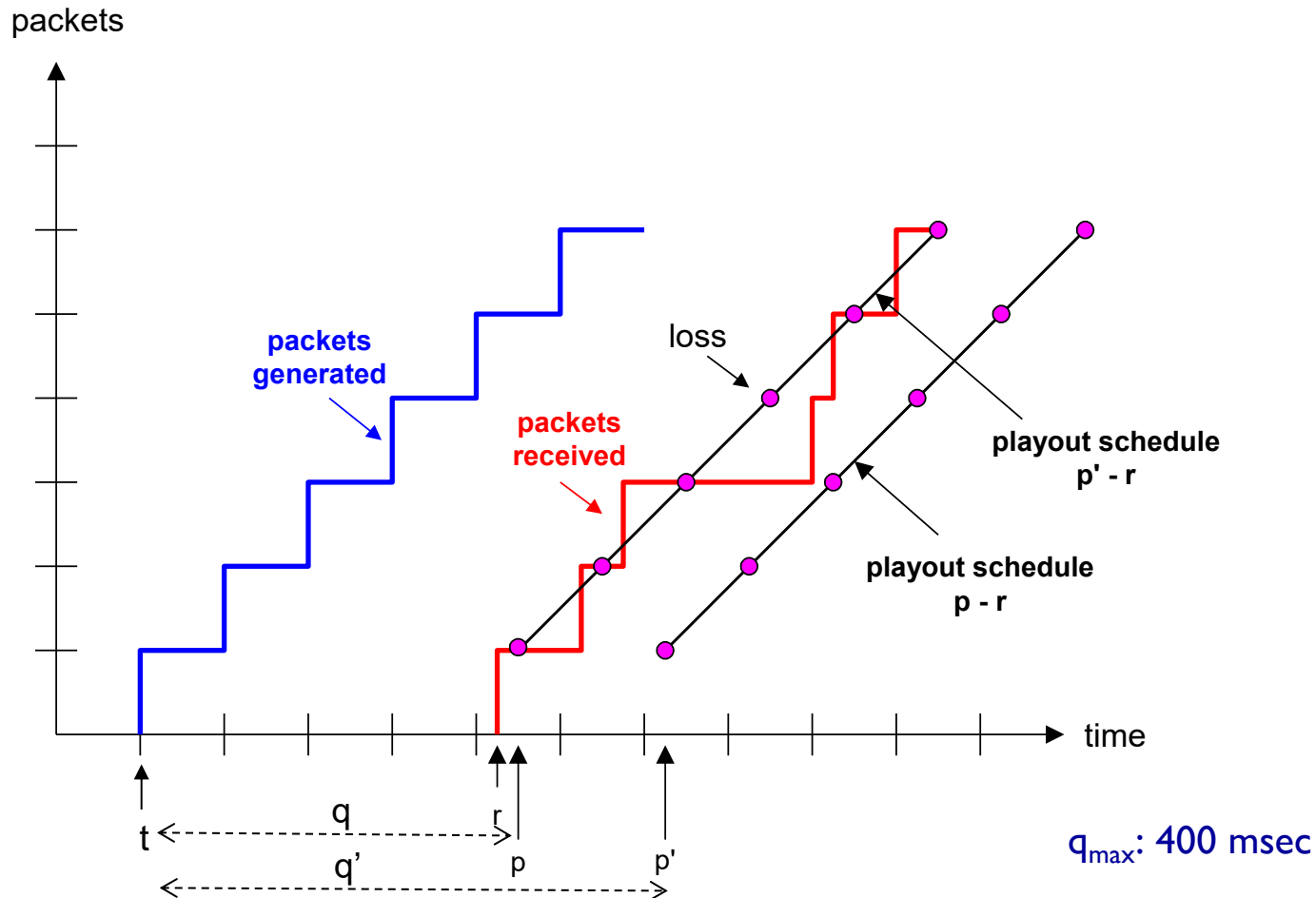
Ο παραλήπτης αναπαράγει κάθε κομμάτι ακριβώς **q** msecs μετά την παραγωγή του.

- Χρονοσφραγίδα παραγωγής = t
- Χρόνος αναπαραγωγής = $p = t + \mathbf{q}$



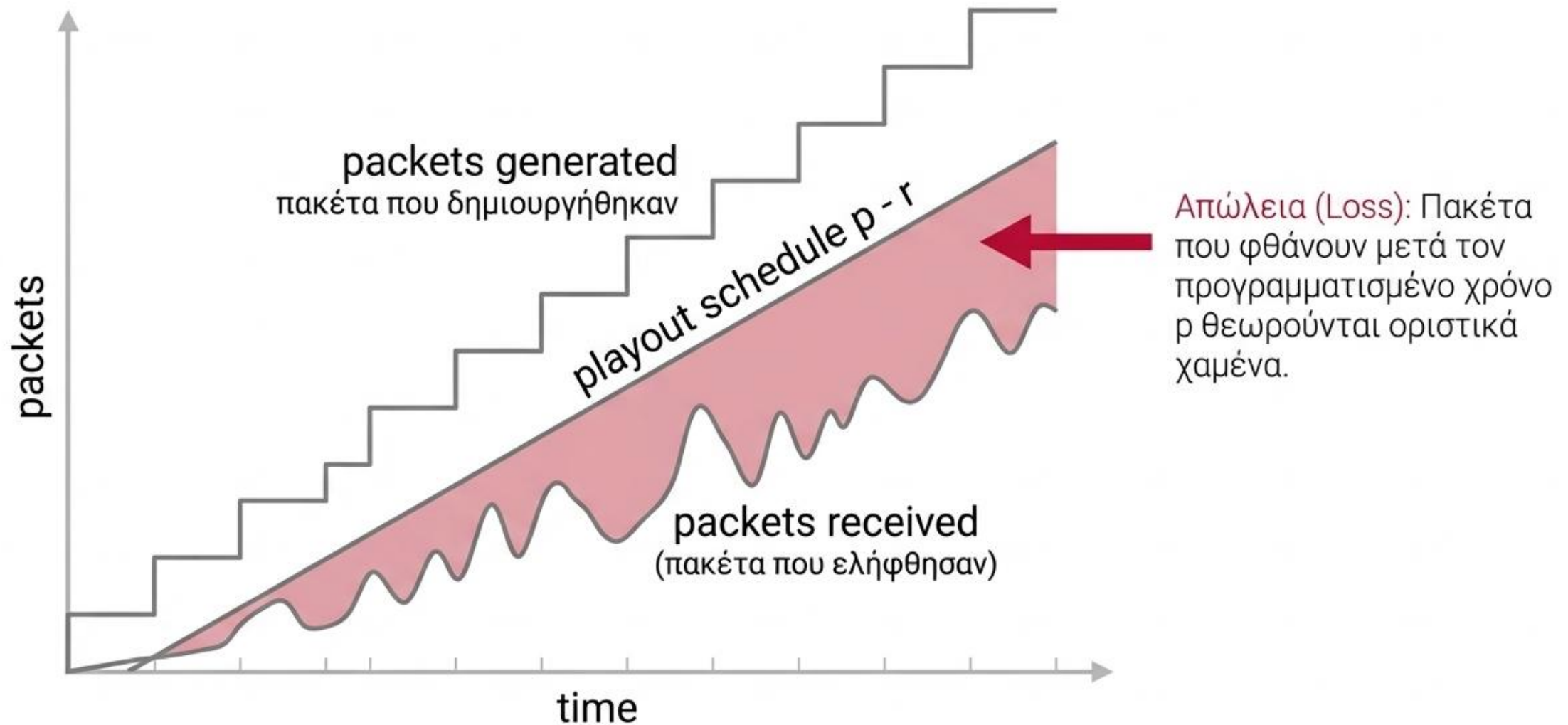
Μέγιστο αποδεκτό όριο καθυστέρησης: 400 msec. Ό,τι φτάνει μετά το $t+q$ απορρίπτεται.

Προσέγγιση 1: Σταθερή καθυστέρηση (2)



- Ο αποστολέας παράγει πακέτα κάθε 20 msec κατά την ομιλία (talk spurt)
- Το πρώτο πακέτο λαμβάνεται σε χρόνο r
- Πρώτη προγραμματισμένη αναπαραγωγή: ξεκινά σε χρόνο p
- Δεύτερη προγραμματισμένη αναπαραγωγή: ξεκινά σε χρόνο p'

Οπτικοποίηση του Σταθερού Χρονοδιαγράμματος



Προσέγγιση 2: Προσαρμοζόμενη καθυστέρηση (1)

Στόχος: διττός

1. Ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης αναπαραγωγής
2. Διατήρηση σε χαμηλά επίπεδα του ρυθμού απώλειας πακέτων λόγω καθυστέρησης

Προσέγγιση: ρυθμιζόμενη καθυστέρηση αναπαραγωγής:

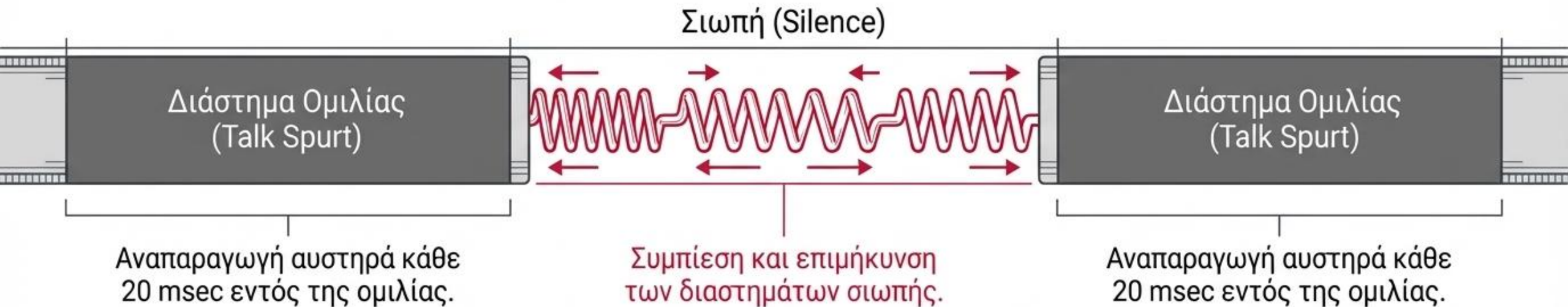
- Παρακολούθηση και υπολογισμός καθυστέρησης δικτύου, προσαρμογή της καθυστέρησης αναπαραγωγής στην αρχή των διαστημάτων ομιλίας (talk spurts).
- **Συμπίεση και επιμήκυνση των διαστημάτων σιωπής**
- Τα αποσπάσματα (chunks) αναπαράγονται κάθε 20 msec κατά την ομιλία.

Δυναμική εκτίμηση της **μέσης καθυστέρησης** d_i στον παραλήπτη με βάρη στην τρέχουσα καθυστέρηση r_i - $d_i := (1 - u)d_{i-1} + u(r_i - t_i)$

όπου u είναι μια σταθερά (π.χ., $u = 0.01$)

Προσέγγιση 2: Προσαρμοζόμενη Καθυστέρηση Αναπαραγωγής

Στρατηγικός Στόχος: (1) Ελαχιστοποίηση καθυστέρησης ΚΑΙ (2) Διατήρηση χαμηλού ρυθμού απωλειών.



Η καθυστέρηση προσαρμόζεται δυναμικά MONO κατά τη διάρκεια της σιωπής, επιτρέποντας στο σύστημα να αναπνέει ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου.



Περίπτωση 2: Προσαρμοζόμενη καθυστέρηση (2)

Είναι επίσης χρήσιμο να εκτιμήσουμε την **μέση απόκλιση καθυστέρησης**, V_i

$$v_i = (1 - u)v_{i-1} + u |r_i - t_i - d_i|$$

Οι εκτιμήσεις d_i και v_i υπολογίζονται για κάθε πακέτο που λαμβάνεται, παρόλο που χρησιμοποιούνται στην αρχή των διαστημάτων ομιλίας (talk spurts).

Για το **πρώτο πακέτο σε ένα διάστημα ομιλίας**, ο χρόνος αναπαραγωγής είναι (έστω πακέτο i):

$$p_i = t_i + d_i + Kv_i$$

όπου K μια θετική σταθερά.

Τα εναπομείναντα πακέτα σε ένα διάστημα ομιλίας αναπαράγονται περιοδικά κάθε 20 msec.

$$p_j = t_j + q_i, \quad \text{όπου } q_i = p_i - t_i = d_i + Kv_i$$

Τα Μαθηματικά της Δυναμικής Εκτίμησης

Μέση Καθυστέρηση (d_i)

$$d_i = (1-u)d_{i-1} + u(r_i - t_i)$$

Βάρος ιστορικού.

Τρέχουσα, πραγματική
καθυστέρηση του
τελευταίου πακέτου.

Διακύμανση Καθυστέρησης / Jitter (v_i)

$$v_i = (1-u)v_{i-1} + u|r_i - t_i - d_i|$$

Η απόλυτη απόκλιση της
τρέχουσας καθυστέρησης από
τον εκτιμώμενο μέσο όρο.

Υπολογισμός του Χρόνου Αναπαραγωγής (Playout Time)

1

Το πρώτο πακέτο (του διαστήματος ομιλίας)

$$p_i = t_i + d_i + K v_i$$

- t_i : Χρόνος παραγωγής.
- d_i : Εκτιμώμενη μέση καθυστέρηση.
- $K v_i$: Περιθώριο ασφαλείας (Όπου K μια θετική σταθερά απορρόφησης εξάρσεων).

2

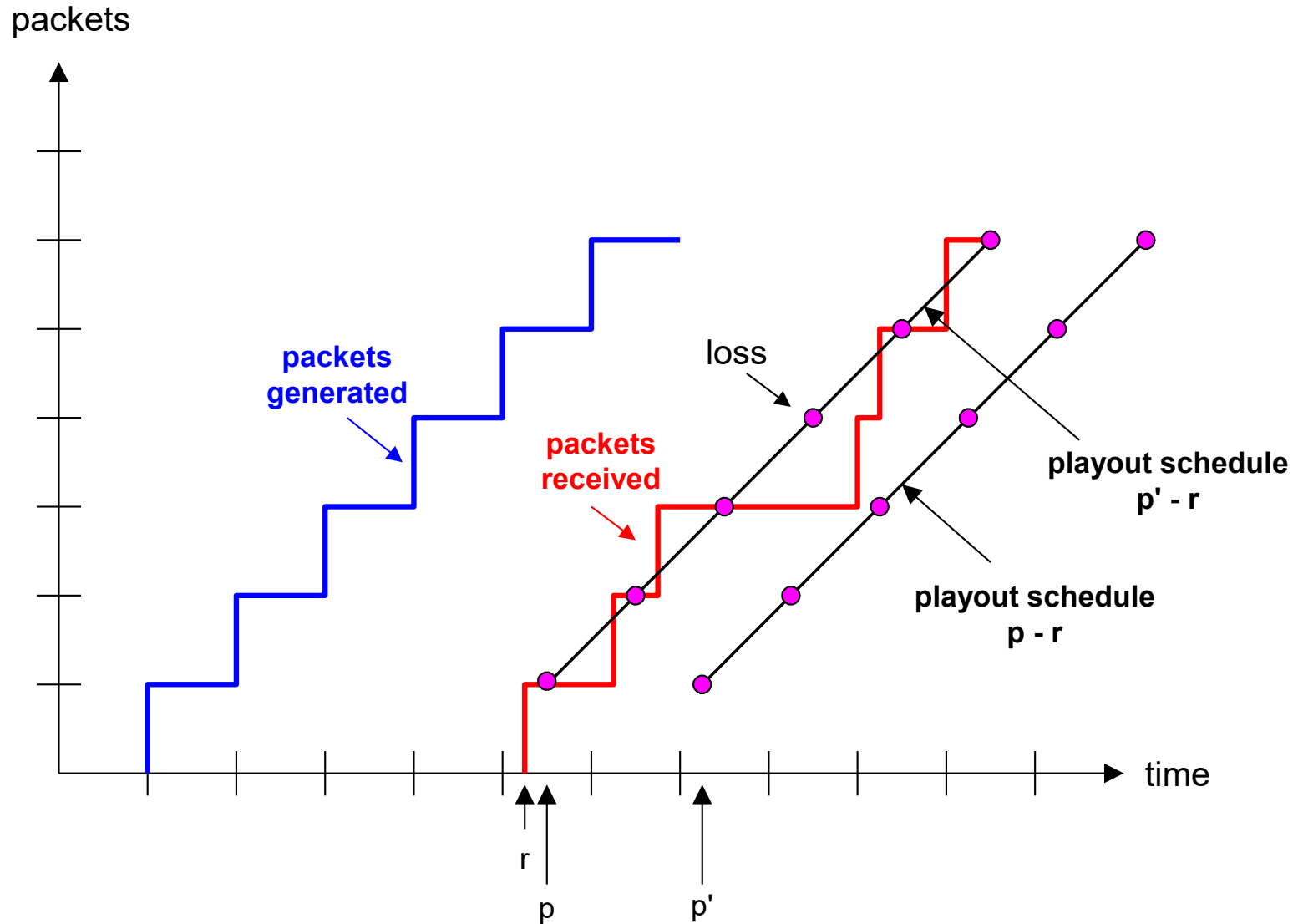
Τα επόμενα πακέτα (στο ίδιο διάστημα)

$$p_j = t_j + q_i$$

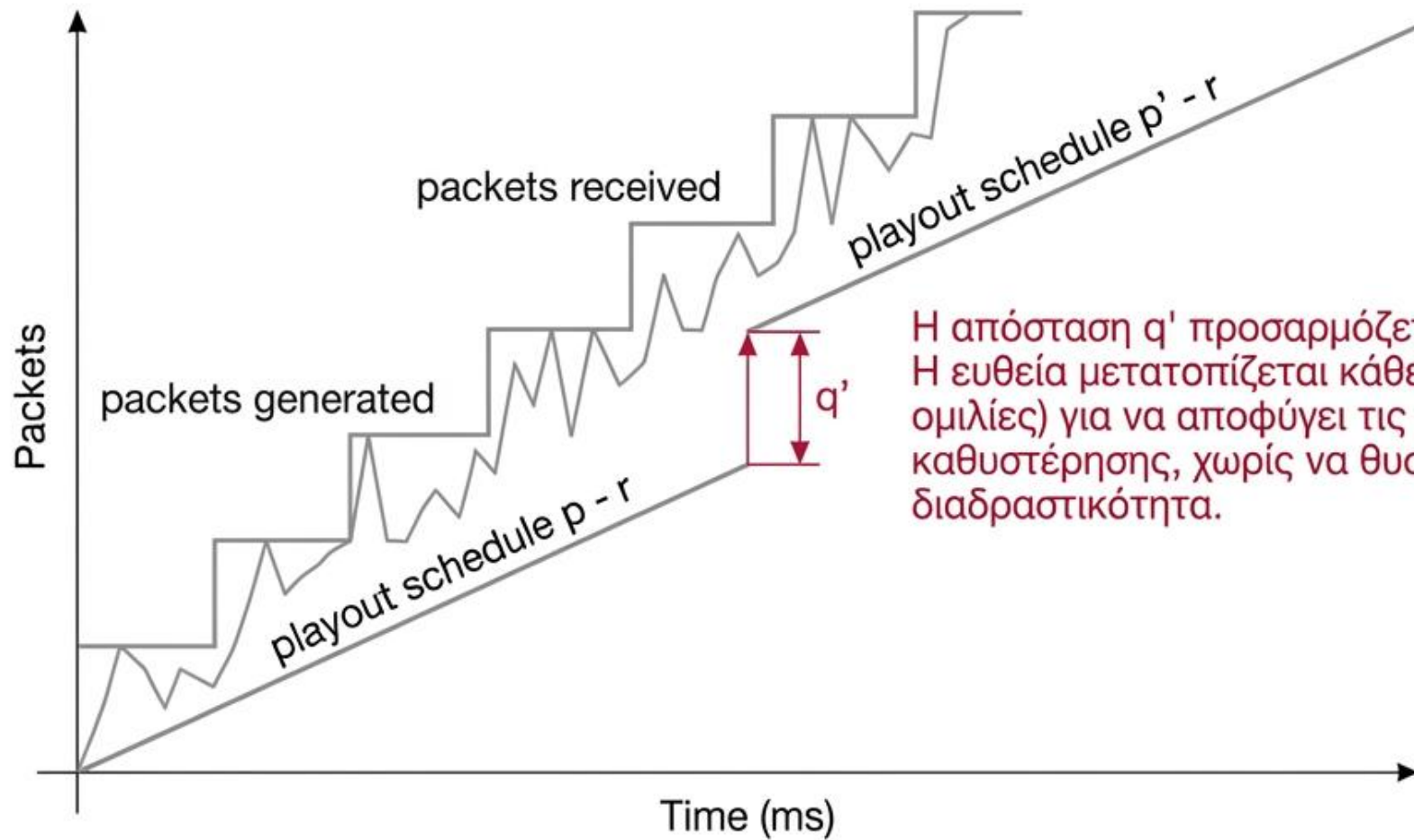
$$q_i = p_i - t_i = d_i + K v_i$$

Εξήγηση: Αναπαραγωγή περιοδικά κάθε 20 msec με κλειδωμένη την καθυστέρηση του πρώτου πακέτου.

Προσέγγιση 2: Προσαρμοζόμενη καθυστέρηση (3)



Οπτικοποίηση του Προσαρμοζόμενου Χρονοδιαγράμματος



Η απόσταση q' προσαρμόζεται. $p' = t_i + d_i + K v_i$.
Η ευθεία μετατοπίζεται κάθετα (ανάμεσα στις
ομιλίες) για να αποφύγει τις εξάρσεις
καθυστερήσης, χωρίς να θυσιάζει μόνιμα τη
διαδραστικότητα.

Προσέγγιση 2: Προσαρμοζόμενη καθυστέρηση (4)

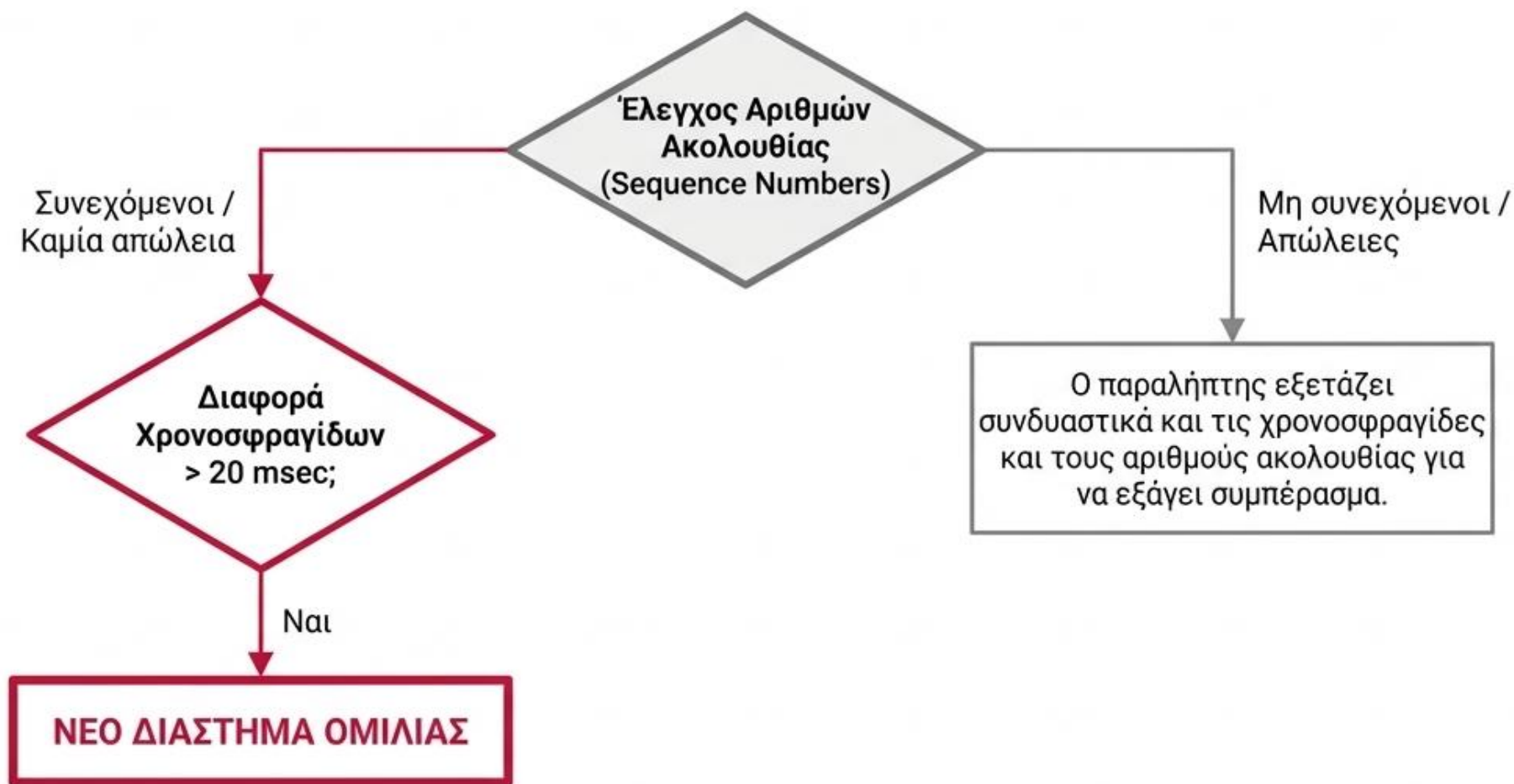
E: Πώς ο παραλήπτης αντιλαμβάνεται ότι ένα πακέτο είναι το πρώτο ενός διαστήματος ομιλίας;

A: Ελέγχει τους **αριθμούς ακολουθίας πακέτων**:

- Εάν συνεχόμενοι -> **Καμία απώλεια**, ο παραλήπτης εξετάζει διαδοχικές χρονοσφραγίδες.
 - Διαφορά διαδοχικών χρονοσφραγίδων $> 20 \text{ msec}$ → ξεκινά νέο διάστημα ομιλίας.
- **Μερικές απώλειες πακέτων**, ο παραλήπτης πρέπει να εξετάσει και τις χρονοσφραγίδες και τους αριθμούς ακολουθίας (sequence numbers).

Αλγόριθμος Ανίχνευσης Διαστήματος Ομιλίας (Talk Spurt)

Πώς ο παραλήπτης γνωρίζει ότι ένα πακέτο είναι το πρώτο μιας νέας ομιλίας?



Σύνθεση: Σταθερή vs. Προσαρμοζόμενη Αναπαραγωγή

	Σταθερή Καθυστέρηση (Fixed)	Προσαρμοζόμενη Καθυστέρηση (Adaptive)
Φιλοσοφία Λειτουργίας	Άκαμπτο όριο καθυστέρησης	Δυναμική παρακολούθηση δικτύου
Μαθηματική Πολυπλοκότητα	Χαμηλή ($p = t + q$)	Υψηλή (Κυλιόμενοι μέσοι d_i, v_i)
Αντιμετώπιση Περιόδων Σιωπής	Σταθερές	Επιμηκύνονται / Συμπιέζονται
Τελικό Αποτέλεσμα Trade-off	Αναγκαστικός συμβιβασμός μεταξύ απωλειών και διαδραστικότητας	Βελτιστοποίηση και των δύο, με κόστος σε υπολογιστική ισχύ

Η προσαρμοζόμενη καθυστέρηση αποτελεί τον **πυρήνα των σύγχρονων πρωτοκόλλων VoIP**, καθιστώντας τα ανθεκτικά στις απρόβλεπτες συνθήκες του διαδικτύου.

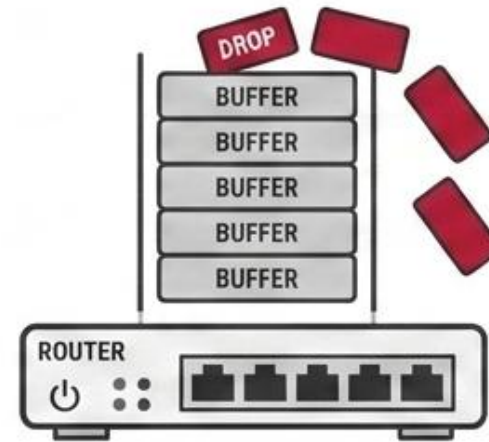
3.3.2 Ανάκαμψη από απώλειες πακέτων στο δίκτυο

Τα Δύο Σημεία Αστοχίας στις Ροές VoIP



1. Καθυστερημένη Άφιξη (Jitter)

Αιτία: Διακύμανση της καθυστέρησης μετάδοσης (λόγω διάδοσης στις ζεύξεις, επεξεργασίας και αναμονής στους δρομολογητές).



2. Απώλειες στο Δίκτυο (Drops)

Αιτία: Γεμάτοι ενταμιευτές (buffers) στους δρομολογητές κατά τη διαδρομή από τον αποστολέα στον παραλήπτη.

Πρόκληση: ανάκαμψη με ανεκτή καθυστέρηση

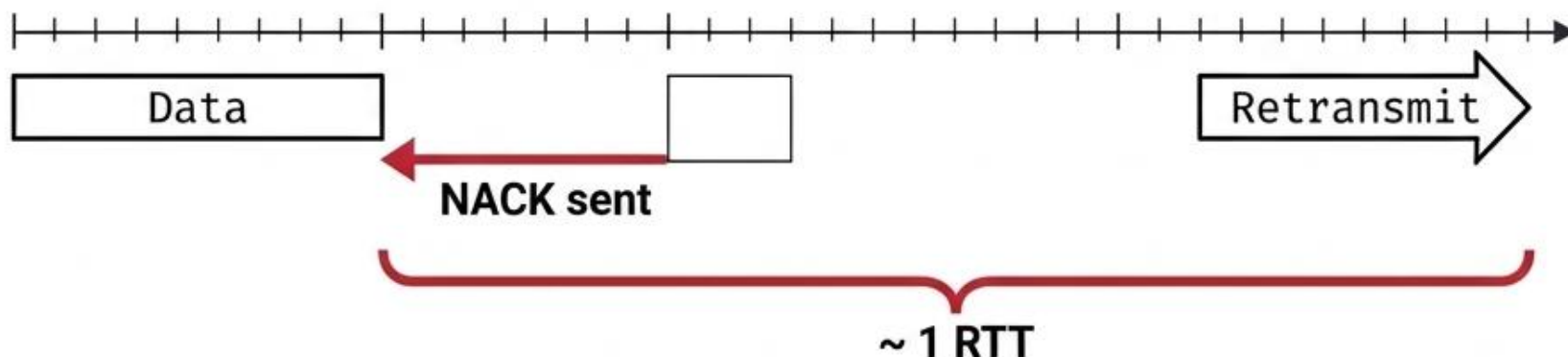
Πρόκληση: ανάκαμψη από απώλεια πακέτων με μικρή ανεκτή καθυστέρηση μεταξύ της αρχικής μετάδοσης και της αναπαραγωγής

- Περίπτωση TCP: Νέα αποστολή χαμένου πακέτου:
 - κάθε ACK/NACK παίρνει ~ 1 RTT (περίπτωση TCP)
- Περίπτωση UDP: Αποστολή πλεονάζουσας πληροφορίας που διορθώνει τυχόν απώλειες
 - Forward Error Correction (FEC): στείλε αρκετά πλεονάζοντα bits για να επιτρέψεις την ανάκαμψη χωρίς αναμετάδοση

Το Πρόβλημα του Χρόνου: Γιατί όχι απλή αναμετάδοση;

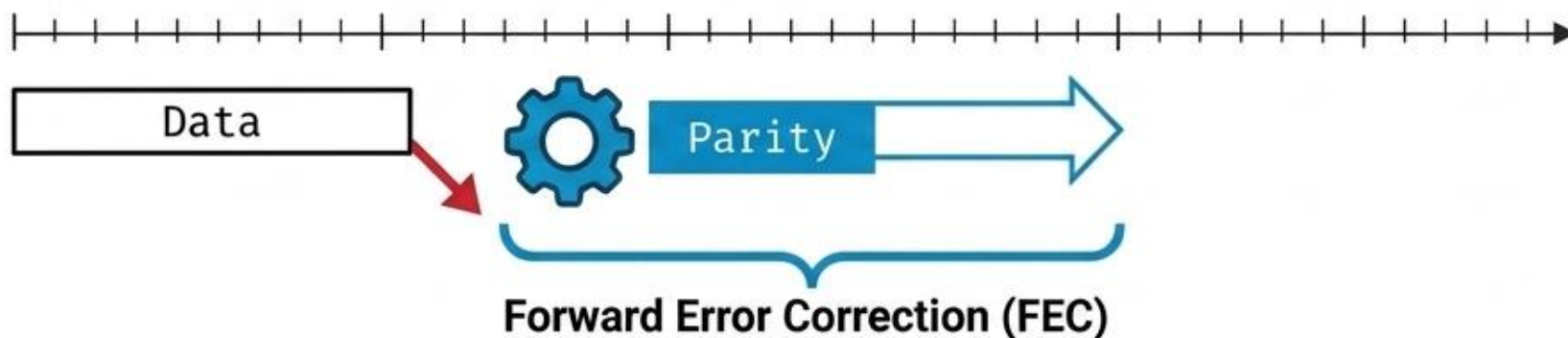
Πρόκληση: Ανάκαμψη με τη μικρότερη ανεκτή καθυστέρηση.

TCP – The Failed Approach



Κάθε ACK/NACK απαιτεί ~1 RTT. Απαγορευτικό για real-time VoIP.

UDP - The Proactive Approach



Η λύση είναι το Forward Error Correction (FEC). Αποστολή επαρκών πλεοναζόντων bits εξ αρχής για ανάκαμψη χωρίς αναμετάδοση.

Στρατηγική 1: Απλό FEC

- Για κάθε ομάδα n αποσπασμάτων (chunks) δημιουργείται ένα πλεονασματικό chunk εφαρμόζοντας **exclusive OR** στις n αρχικές
- Στέλνει $n+1$ chunks, αυξάνοντας το απαιτούμενο bandwidth κατά $1/n$.
- Μπορεί να ανακατασκευάσει τα αρχικά n chunks, εάν χαθεί το πολύ ένα chunk από τα $n+1$.
- Αυξάνει την καθυστέρηση αναπαραγωγής καθώς πρέπει να ληφθούν/ελεγχθούν τα $n+1$ αποσπάσματα

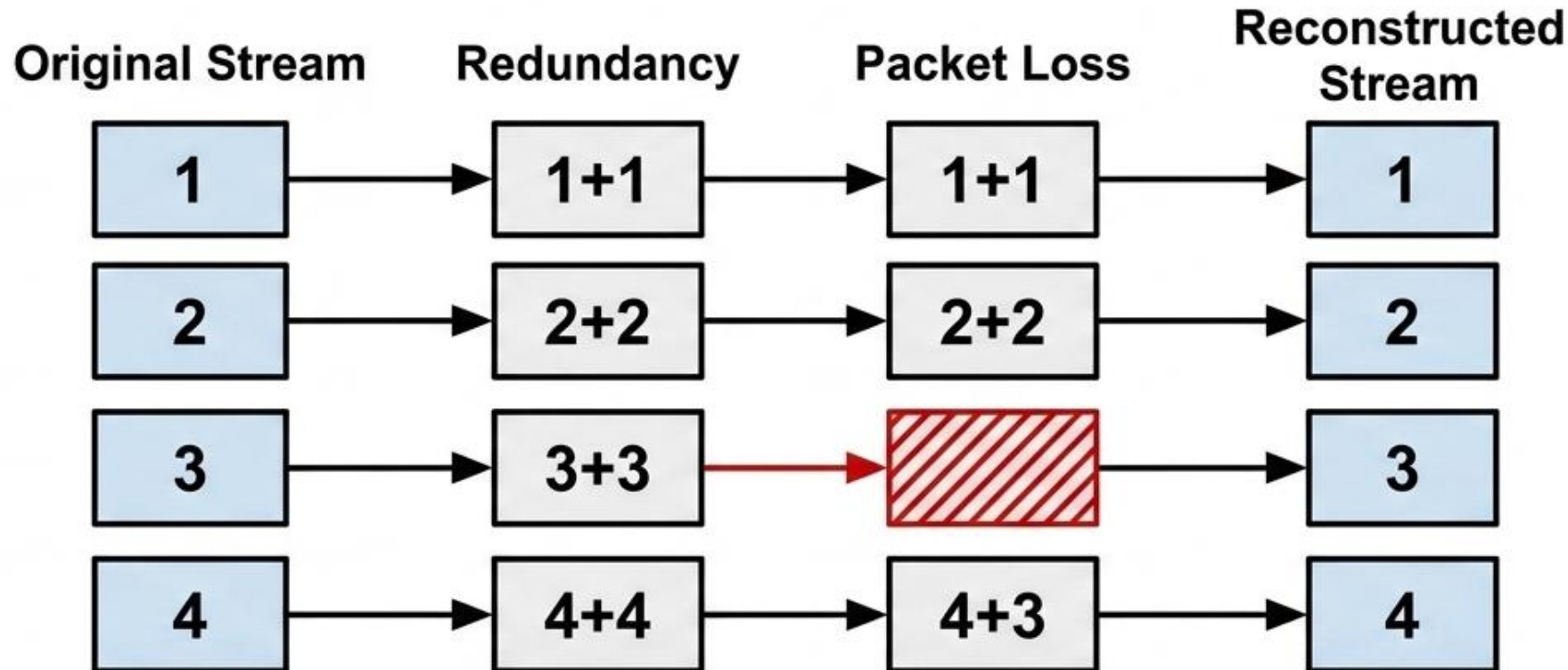
XOR truth table

Input		Output
A	B	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Στρατηγική 1: Απλό FEC (Redundancy)

Αύξηση Απαιτούμενου Bandwidth = $1/n$

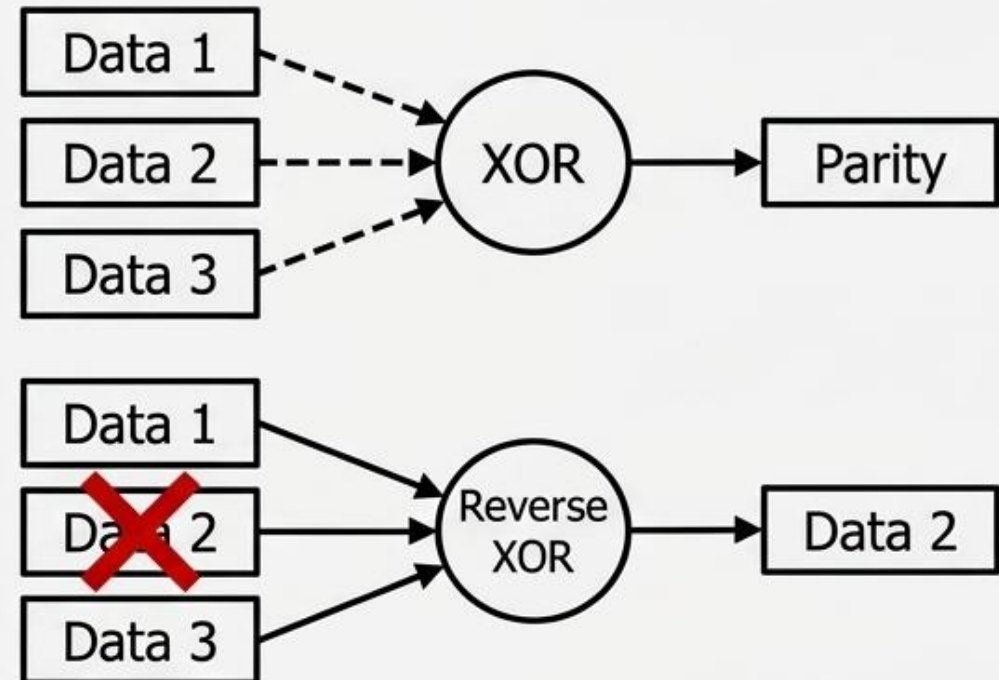
Για κάθε ομάδα n αποσπασμάτων (chunks), δημιουργείται ένα πλεονασματικό chunk.



Η Λογική του Exclusive OR (XOR)

Ο πλεονασμός δεν είναι απλή αντιγραφή. Παράγεται εφαρμόζοντας τη λογική πράξη XOR στα n αρχικά αποσπάσματα.

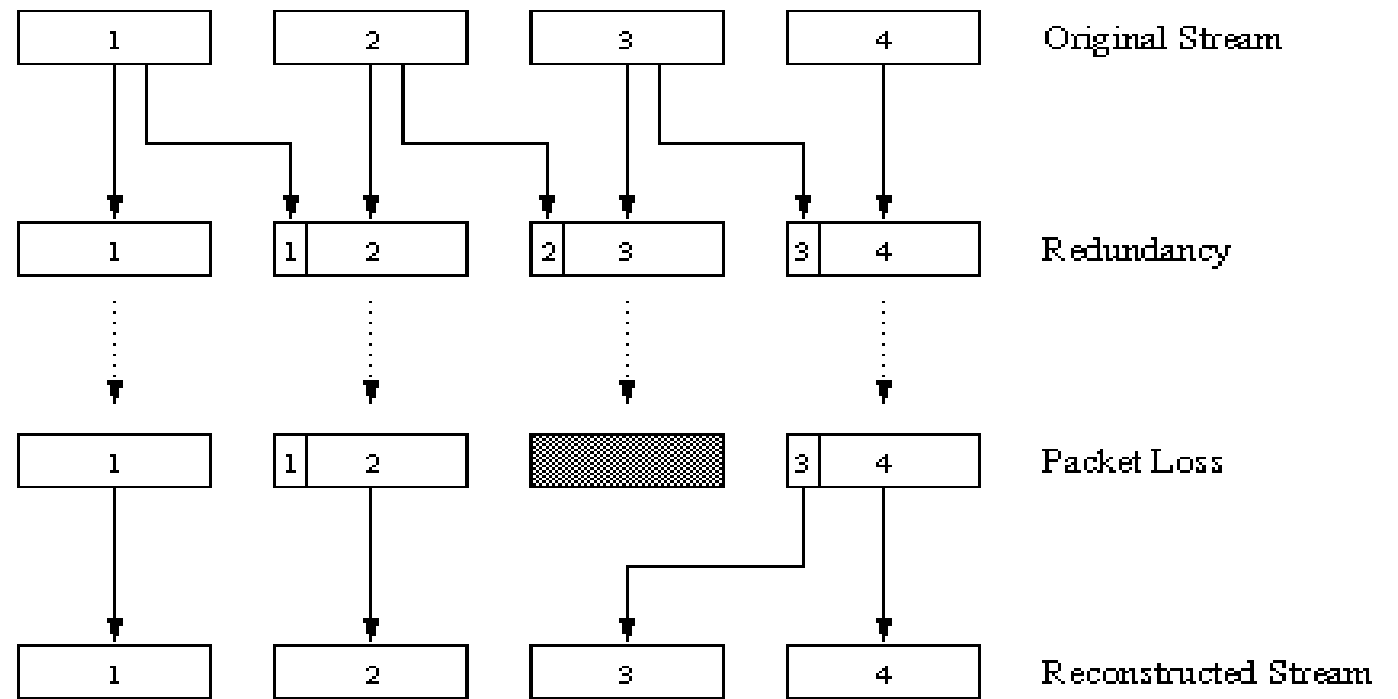
Input		Output
A	B	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



Μπορεί να ανακατασκευάσει τα αρχικά n chunks μόνο εάν χαθεί το πολύ ένα chunk από τα $n+1$.

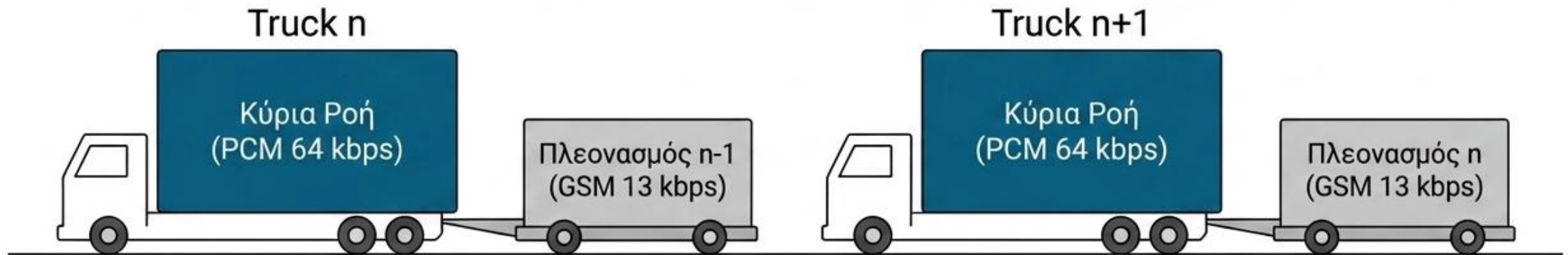
Στρατηγική 2: Σχήμα FEC piggyback lower quality stream

- Παράλληλη αποστολή μικρότερης ανάλυσης ροής δεδομένων ήχου ως πλεονάζουσα πληροφορία
- παράδειγμα: κανονική ροή PCM στα 64 kbps και πλεονάζουσα ροή GSM στα 13 kbps



Στρατηγική 2: Piggyback Lower Quality Stream

Παράλληλη αποστολή μιας μικρότερης ανάλυσης ροής δεδομένων ήχου ως πλεονάζουσα πληροφορία.



Καλύπτει την απώλεια με χαμηλότερη ποιότητα, εξοικονομώντας εύρος ζώνης σε σχέση με το Απλό FEC.

Τι πετυχαίνει

- Σε απώλεια μη-διαδοχικών πακέτων, ο παραλήπτης μπορεί να συγκαλύψει την απώλεια.
- Μπορεί επίσης να προσθέσει το $(n-1)$ -ιοστό και $(n-2)$ -ιοστό από την χαμηλού ρυθμού bit έκδοση του υλικού.

Technical Blueprint

Δυνατότητες Συγκάλυψης (Piggyback FEC)



Ανοχή σε Απώλειες

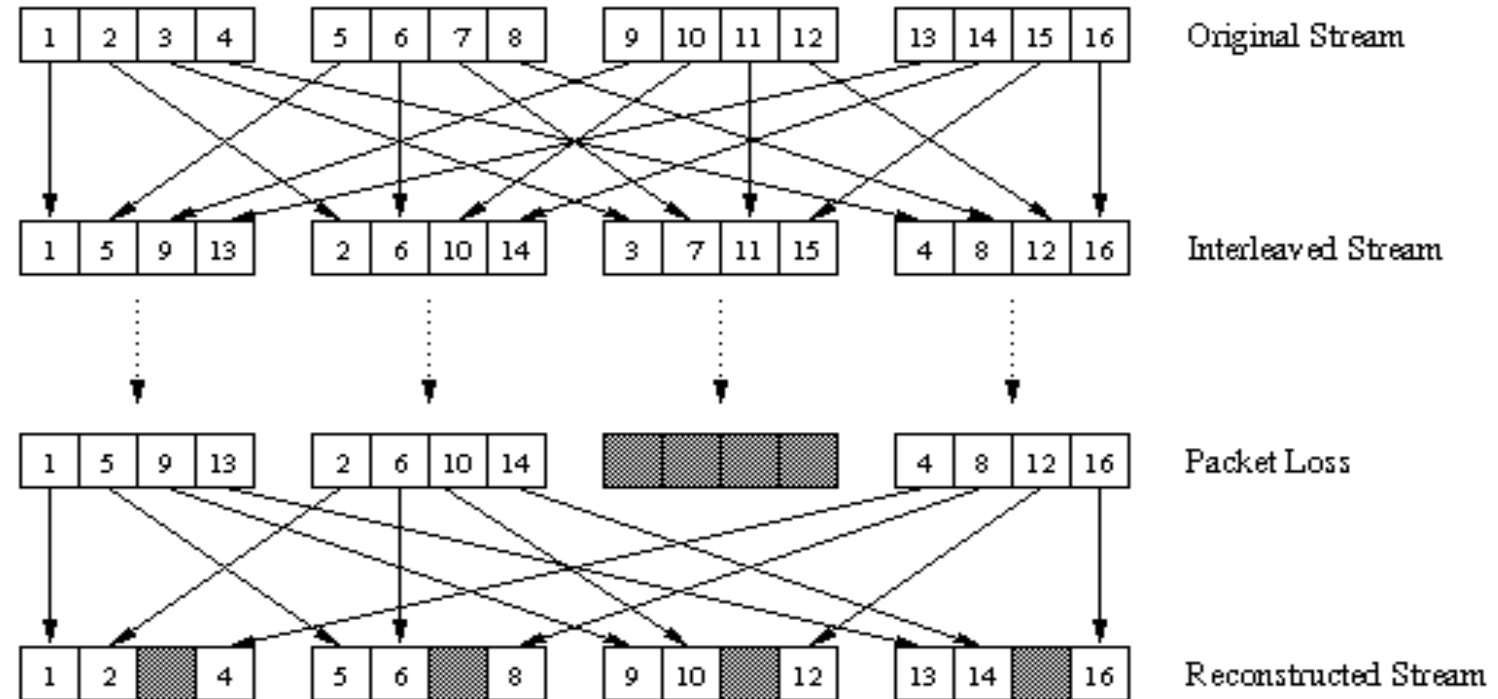
Ανοχή στην εθραυσή σε Απώλειες
πενγρεος και το τέγκουσε σε
Απώλειες

Κλιμάκωση Πλεονασμού

Κλιμάκωση πλεονασμού των
πλεονασμού κιτάση της
δναπυδοσατρα νος απώλειες

Στρατηγική 3: Διάπλεξη (interleaving)

- Τα αρχικά πακέτα διασπώνται σε μικρότερα κομμάτια
- Για παράδειγμα, 4 κομμάτια (των 5 msec) για κάθε αρχικό πακέτο
- Τα μεταδιδόμενα πακέτα περιλαμβάνουν μικρά κομμάτια από διαφορετικά chunks

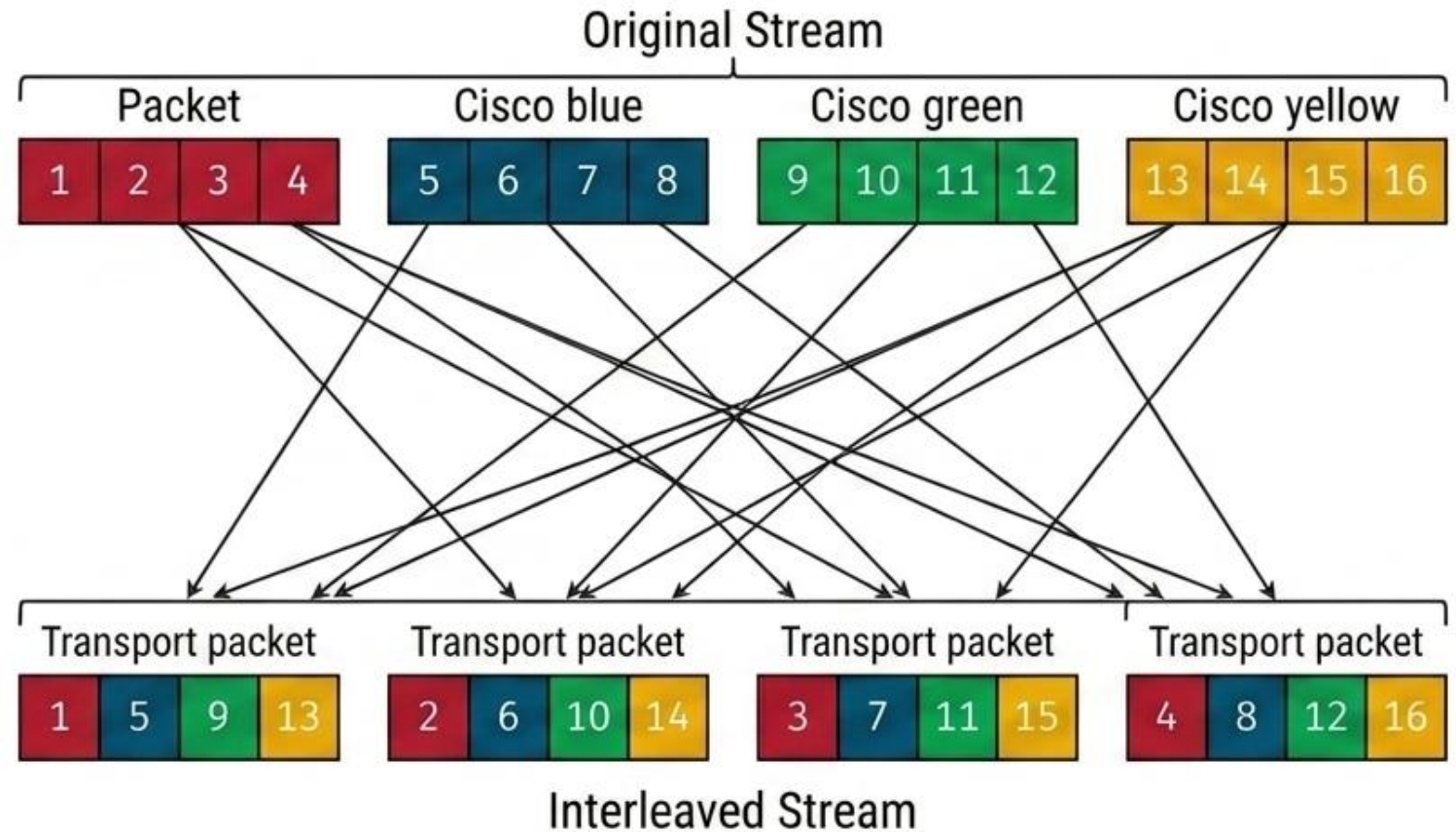


Τι πετυχαίνει:

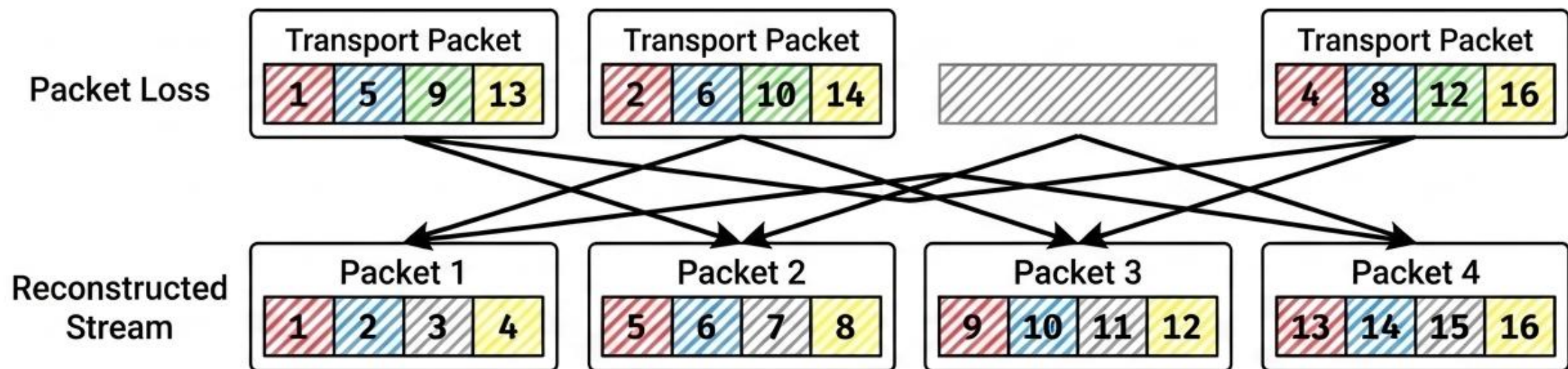
- Αν χαθεί ένα πακέτο, εξακολουθούμε να έχουμε το μεγαλύτερο μέρος της αρχικής πληροφορίας
- Δεν προσθέτει πλεονασμό, όμως αυξάνει την καθυστέρηση αναπαραγωγής

Στρατηγική 3: Διάπλεξη (Interleaving)

- **Μηχανισμός:** Τα αρχικά πακέτα διασπώνται σε μικρότερα κομμάτια (π.χ., 4 κομμάτια των 5 msec).
- **Ανακατασκευή:** Τα μεταδιδόμενα πακέτα πλέον περιλαμβάνουν μικρά κομμάτια από διαφορετικά αρχικά chunks.



Κατανομή της Ζημιάς (Χωρίς Πλεονασμό)



✓ Πλεονέκτημα (Advantage)

Αν χαθεί ένα πακέτο στο δίκτυο, εξακολουθούμε να έχουμε το μεγαλύτερο μέρος από κάθε αρχικό πακέτο. Δεν προσθέτει απολύτως κανένα πλεονασμό (Redundancy = 0).

⚠ Αντιστάθμισμα (The Trade-off)

Σημαντική αύξηση στην καθυστέρηση αναπαραγωγής, καθώς ο παραλήπτης πρέπει να περιμένει πολλαπλά πακέτα για να ανακατασκευάσει έστω και το πρώτο.

Αρχιτεκτονική Σύγκριση: Τεχνικές Ανάκαμψης VoIP

Τεχνική	Μηχανισμός	Εύρος Ζώνης (Overhead)	Καθυστέρηση
Απλό FEC	Πλεονασμός μέσω XOR	Υψηλή (+ 1/n)	Μέτρια (Αναμονή n+1)
Piggyback	Υποβιβασμένη Ποιότητα	Χαμηλή (π.χ. + 13kbps)	Χαμηλή (Άμεση αντικατάσταση)
Διάπλεξη	Χρονική Διασπορά	Μηδενική (0%)	Υψηλή (Αναμονή ολόκληρου του block)

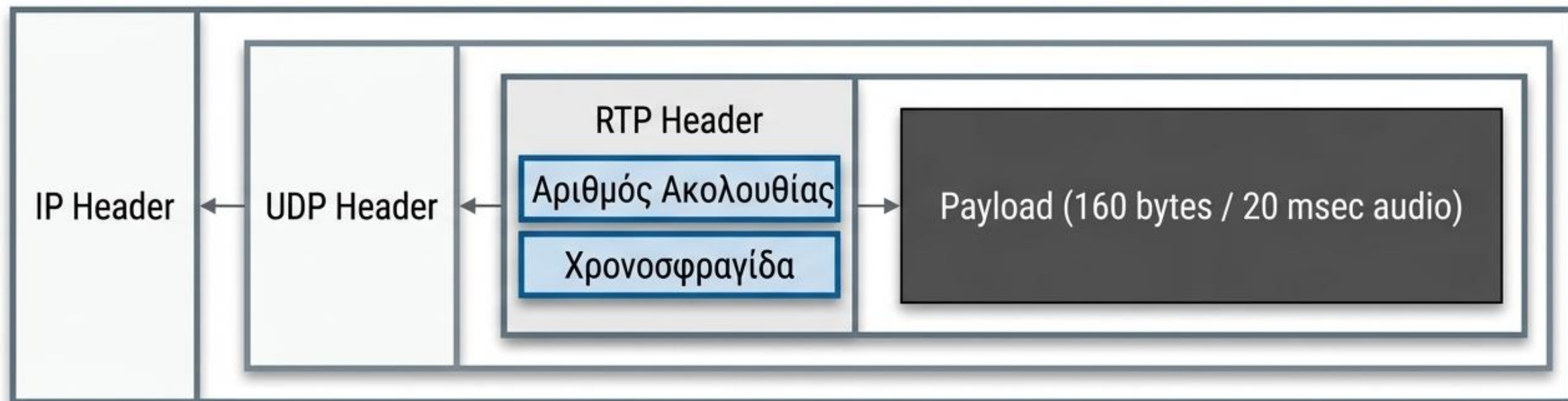
Συμπέρασμα: Η επιλογή εξαρτάται από τους περιορισμούς του δικτύου. Όταν το bandwidth είναι σπάνιο, η διάπλεξη υπερέχει. Όταν η ελάχιστη καθυστέρηση είναι κρίσιμη, το Piggyback κυριαρχεί.

3.4 Υπολογισμός RTT, Jitter & Ρυθμό απώλειας πακέτων

Η Αρχιτεκτονική Επιλογή: Γιατί UDP και όχι TCP;

TCP: Η Ακατάλληλη Επιλογή	UDP: Η Βασική Υποδομή
Μηχανισμός: Εγγυημένη παράδοση μέσω αναμεταδόσεων (ACK/NACK).	Μηχανισμός: Υπηρεσία Best-effort χωρίς καμία εγγύηση παράδοσης.
Επίπτωση στην Καθυστέρηση: Μια αναμετάδοση μπορεί εύκολα να εκτοξεύσει την καθυστέρηση >400msec.	Επίπτωση στην Καθυστέρηση: Ελάχιστη. Τα δεδομένα προωθούνται όσο πιο γρήγορα γίνεται.
Έλεγχος Συμφόρησης: Μειώνει το ρυθμό μετάδοσης όταν εντοπίζει συμφόρηση, προκαλώντας περαιτέρω απώλειες λόγω καθυστέρησης.	Εξαίρεση (Skype): Χρησιμοποιεί UDP, εκτός αν η επικοινωνία μπλοκάρεται από NAT ή Firewall (τότε ως έσχατη λύση πέφτει σε TCP).

Διαστρωμάτωση & Ενθυλάκωση Στοιβάς (Protocol Stack)



Το RTP εφαρμόζει την αρχή του Application-Layer Framing. Δεν βρίσκεται στο λειτουργικό σύστημα, αλλά εξοπλίζει τα δεδομένα της εφαρμογής με:

1. **Αριθμός Ακολουθίας** (16 bits): Εντοπισμός χαμένων ή εκτός σειράς πακέτων.
2. **Χρονοσφραγίδα**: Απαραίτητη για συγχρονισμό και έλεγχο ρυθμού.

Τα Δίδυμα Πρωτόκολλα: Δεδομένα vs. Έλεγχος

Δεδομένα vs. Έλεγχος

RTP (Real-time Transport Protocol)

Ρόλος: Data Plane. Μεταφορά πραγματικού χρόνου (ήχος/βίντεο).

Θύρες: Χρησιμοποιεί άρτιους αριθμούς θυρών (even ports).



RTCP (RTP Control Protocol)

Ρόλος: Control Plane. Παρακολούθηση στατιστικών μετάδοσης, Quality of Service (QoS) και συγχρονισμός πολλαπλών ροών.

Bandwidth: Ελαφρύ πρωτόκολλο, καταναλώνει τυπικά ~5% του εύρους ζώνης.

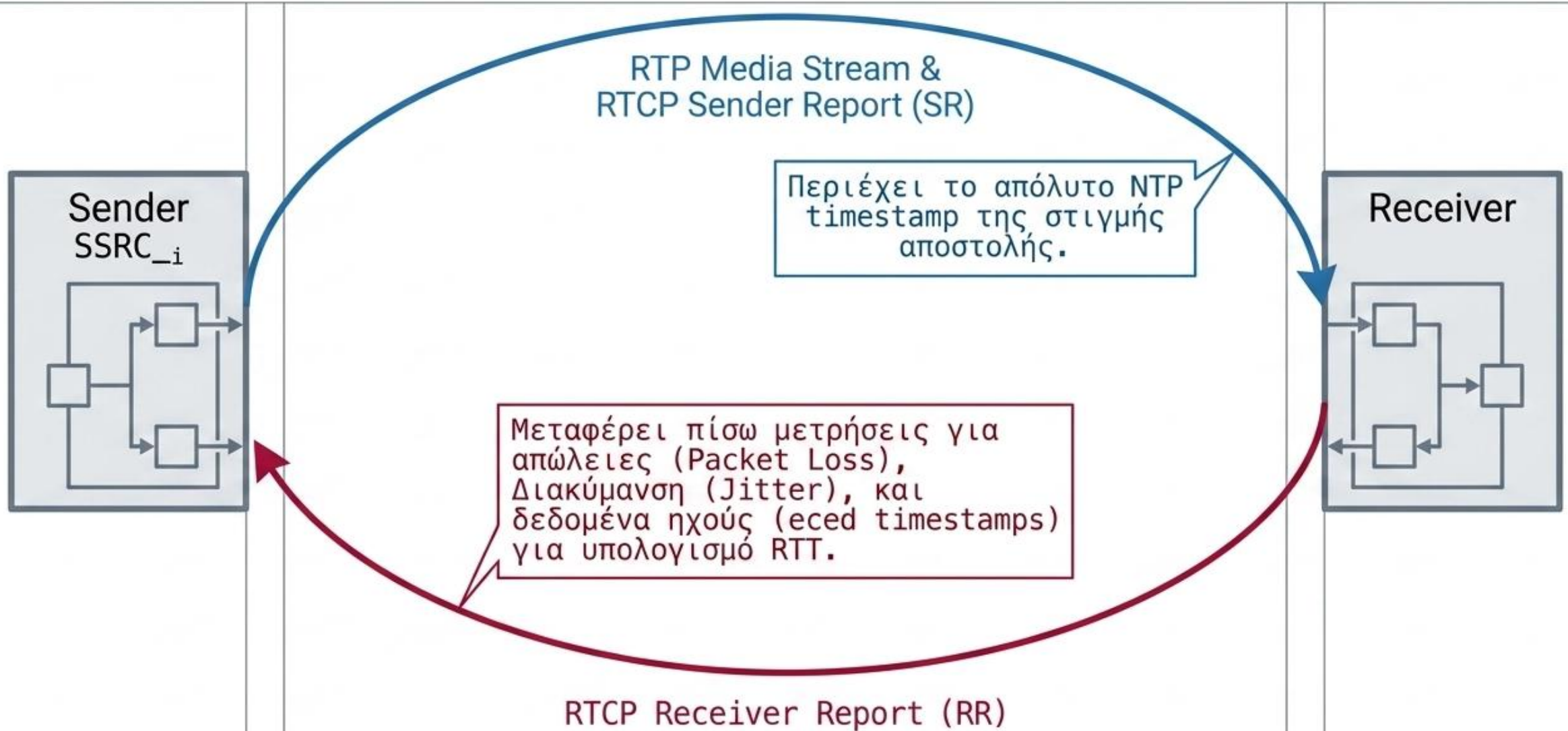
Θύρες: Χρησιμοποιεί την αμέσως επόμενη περιττή θύρα (odd port).



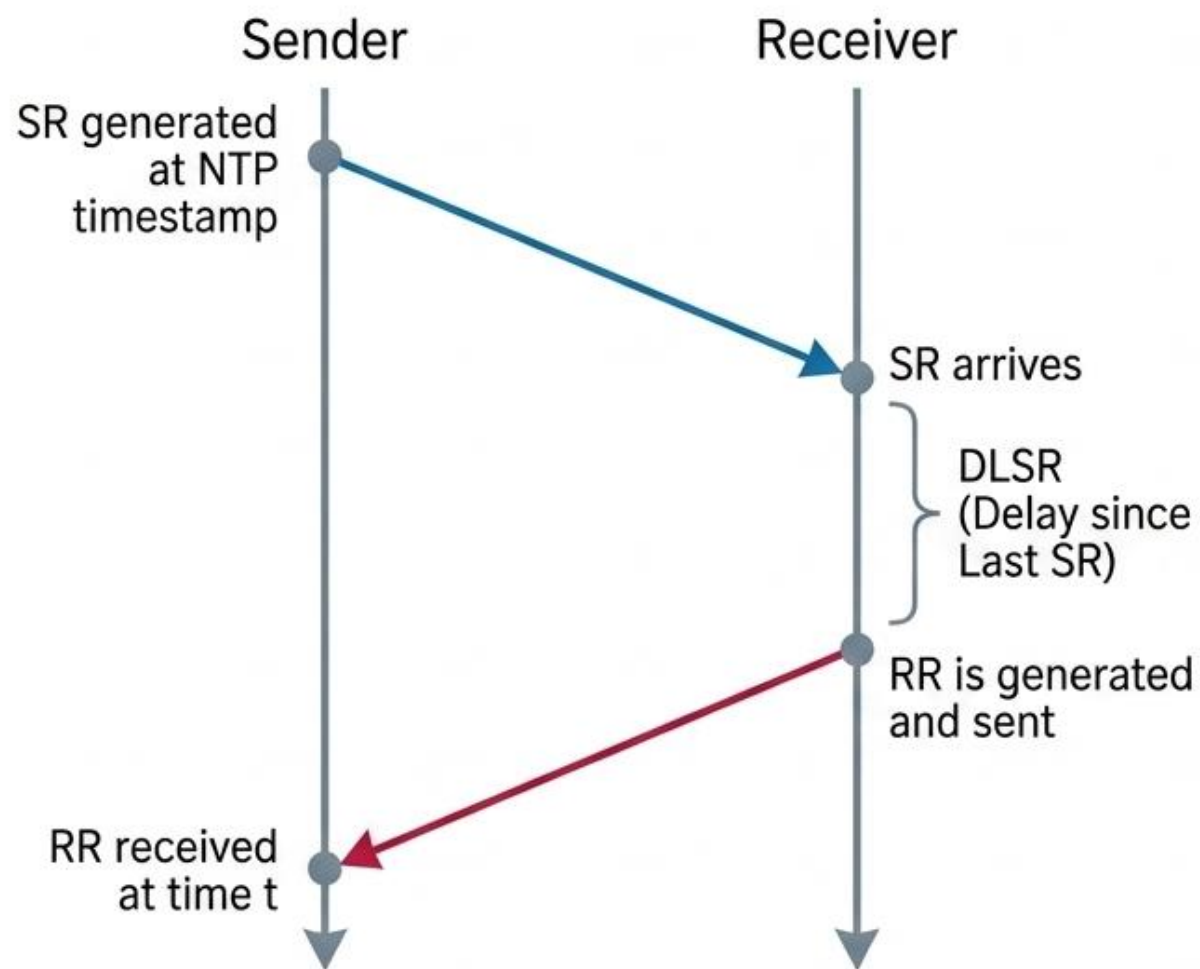
Μηχανισμοί RTP: Ανίχνευση Απωλειών & Talk Spurts



RTCP: Ο Κύκλος των Αναφορών (SR & RR)



Μαθηματική Ανάλυση I: Υπολογισμός Round Trip Time (RTT)

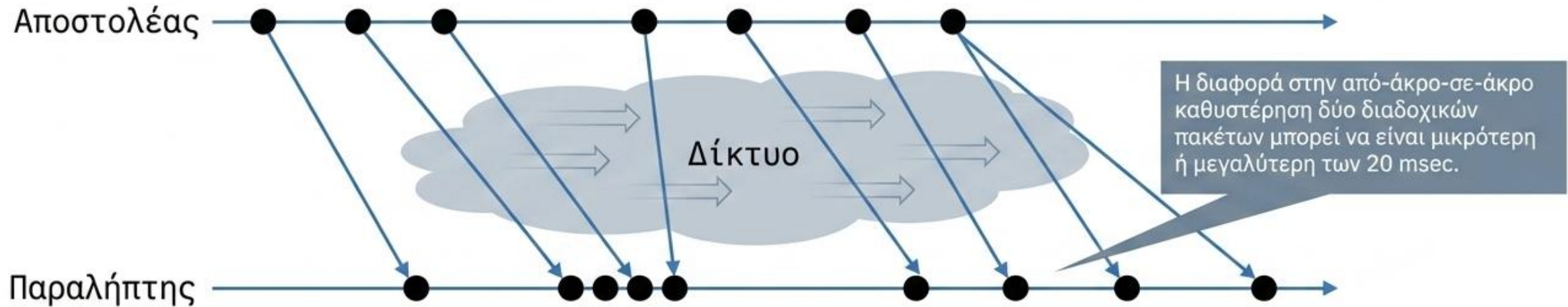


Ορισμοί Μεταβλητών

- t:** Η τρέχουσα χρονική στιγμή άφιξης του RR στην πηγή.
- LSR:** Timestamp τελευταίας λήψης SR (αντιγραφή των μεσαίων 32-bits του NTP timestamp).
- DLSR:** Ο χρόνος που μεσολάβησε στον παραλήπτη από τη λήψη του SR μέχρι την αποστολή του RR.

$$RTT = t - LSR - DLSR$$

Μαθηματική Ανάλυση II: Καθυστέρηση & Διακύμανση



Ορισμοί Μεταβλητών

S_i : RTP Timestamp (Χρόνος αποστολής του πακέτου i).

R_i : Χρόνος άφιξης του πακέτου i (σε μονάδες RTP timestamp).

Υπολογισμός Τύπου

Βήμα 1 (Καθυστέρηση 1-δρόμου):

$$D(i) = R_i - S_i$$

(Η από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το πακέτο i).

Βήμα 2 (Διακύμανση Καθυστέρησης):

$$DV(i,j) = D(j) - D(i) = (R_j - S_j) - (R_i - S_i)$$

(Η διαφορά καθυστέρησης μεταξύ δύο διαδοχικών πακέτων).

Μαθηματική Ανάλυση II: Η Εξίσωση Inter-arrival Jitter

$$\text{Jitter}(i) = \text{Jitter}(i-1) + \underbrace{\frac{(|\text{DV}(i-1,i)| - \text{Jitter}(i-1))}{16}}_{\text{Φίλτρο Χαμηλής Διέλευσης (Low-pass Filter)}}$$

Φίλτρο Χαμηλής Διέλευσης (Low-pass Filter)

Ορισμός

Το Inter-arrival Jitter ορίζεται ως η εξομαλυμένη απόλυτη τιμή (smoothed absolute value) της διακύμανσης DV.

Μηχανισμός

Υπολογίζεται συνεχώς για κάθε νέο πακέτο δεδομένων i . Ο διαιρέτης 16 λειτουργεί ως φίλτρο χαμηλής διέλευσης (low-pass filter) για να εξομαλύνει απότομες και προσωρινές αυξομειώσεις της καθυστέρησης, παρέχοντας μια σταθερή μέτρηση για το QoS.

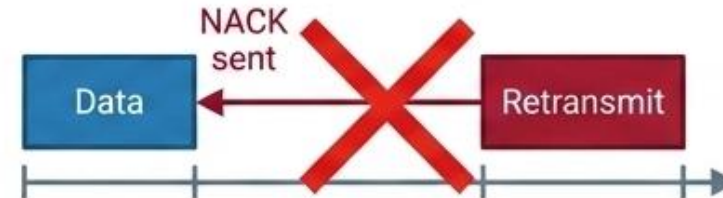
Μαθηματική Ανάλυση III: Υπολογισμός Packet Loss Rate

$$\text{Ρυθμός Απώλειας} = \frac{(\text{Expected} - \text{Received})}{\text{Expected}}$$

Expected: Ο εκτεταμένος (extended) τελευταίος αριθμός ακολουθίας μείον τον αρχικό αριθμό ακολουθίας που ελήφθη.

Ανεκτά όρια απώλειας: 1% - 10%.
Πάνω από 10-20%, η ποιότητα καταρρέει.

TCP (Failed Approach)



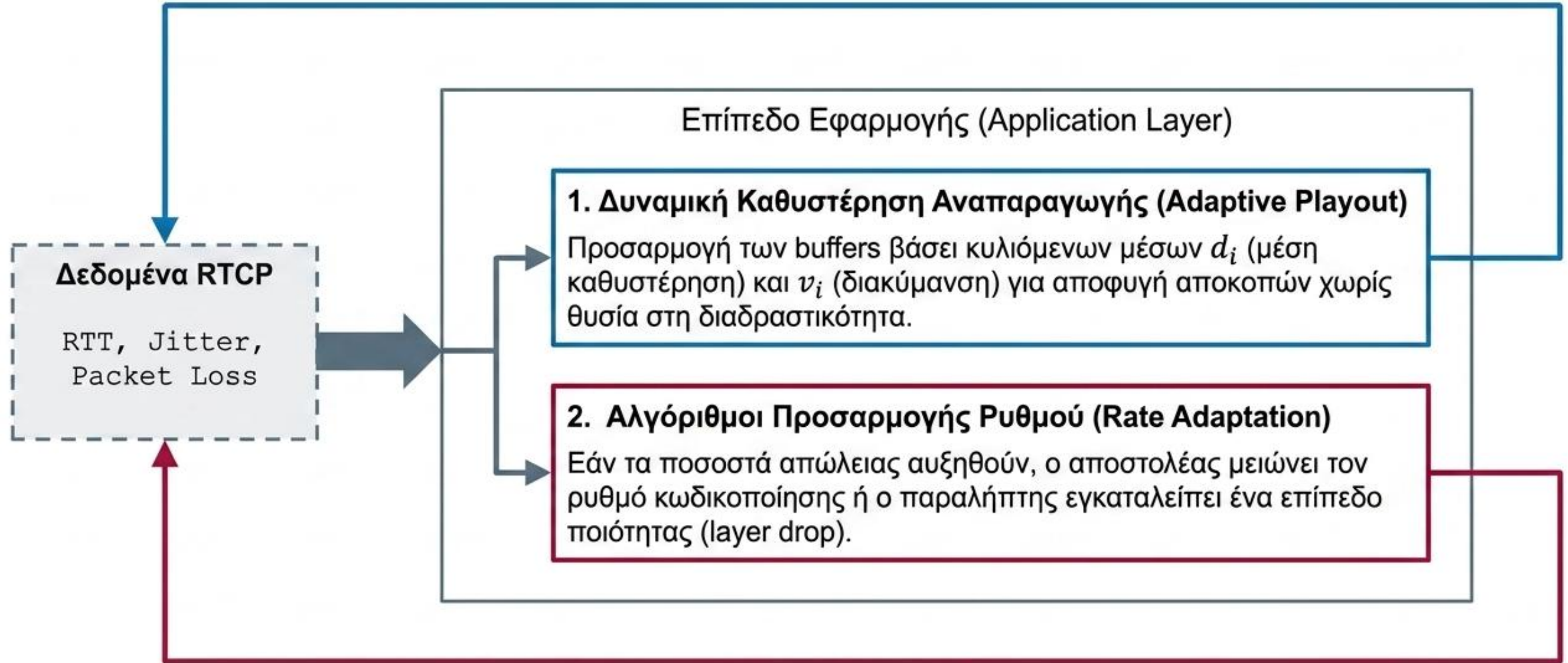
Κόστος ~1 RTT.
Απαγορευτικό.

UDP (Proactive Approach)



Η ανάκαμψη γίνεται προληπτικά (Forward Error Correction), με πλεοκαμψη πλεονασματικά bits εξ αρχής.

Σύνθεση: Ο Κύκλος Ανατροφοδότησης (Feedback Loop)



- Η παρούσα παρουσίαση έχει οπτικοποιηθεί με χρήση του εργαλείου TN (AI) NotebookLM της Google.
- Για την δημιουργία του έχουν χρησιμοποιηθεί οι διαφάνειες του μαθήματος, οι οποίες εμπεριέχονται.
- Συγγραφέας: Δρ. Παντελής Μπαλαούρας, Ε.Δ.Ι.Π., Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Ε.Κ.Π.Α.